



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV VÝKONOVÉELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**VYUŽITÍ LABORATORNÍHO STANDU S MĚNIČI A
MOTORY VE VÝUCE ELEKTRICKÝCH POHONŮ**

UTILIZATION OF THE LABORATORY STAND WITH INVERTERS AND MOTORS IN
THE TEACHING PROCESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miroslav Holub

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Miroslav Holub

ID: 173655

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Využití laboratorního standu s měniči a motory ve výuce elektrických pohonů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte inovaci budiče laboratorního standu dle pokynů vedoucího.
2. Ověřte funkci řídicí a silové části.
3. Proveďte zatěžovací zkoušky systému a ověřte funkci chlazení.
4. Navrhněte konstrukční řešení mechanických částí a zrealizujte je.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PATOCKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUTIM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [2] Vorel P., Patocka M., Průmyslová elektronika, Vydání 1., skriptum FEKT VUT Brno, 2007
- [3] SKALICKÝ, J. Navrhování elektrických pohonů. Navrhování elektrických pohonů. Brno: VUT FEKT, 2002.

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 31. 5. 2017

Vedoucí práce: Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

Konzultant:




doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o laboratorním standu k výuce v předmětu elektrických pohonů. Toto zařízení je vyvíjeno na ústavu UVEE a již existuje funkční prototyp. Náplní této práce byla převážně revize desky budičů použitého modulu tranzistorů MOSFET, dále pak fyzická realizace jednotlivých pracovišť, jichž je celkově vyráběno 8 kusů. Závěrem práce byly otestovány parametry současného prototypu zejména z hlediska výkonového dimenzování.

Klíčová slova

laboratorní stand, budič, MOSFET, Avago, ACPL333J, měnič, stejnosměrný motor, asynchronní motor

Abstract

This bachelor thesis is about laboratory stand for electrical drives lessons. This facility is developed by UVEE department and functional prototype is already finished. Main subject of this thesis was revising of gate driver circuit board and physical realization of further workplaces. At overall 8 identical workplaces are constructed. Last part of thesis was testing of actual prototype performance especially its load capability.

Keywords

laboratory stand, gate driver, MOSFET, Avago, ACPL333J, inverter, DC motor, induction motor

Bibliografická citace:

HOLUB, M. *Využití laboratorního standu s měniči a motory ve výuce elektrických pohonů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 48s. Vedoucí práce : Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma **Využití laboratorního standu s měniči a motory ve výuce elektrických pohonů** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího *bakalářské* práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **31. května 2016**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu *bakalářské* práce Ing. Daliborovi Červinkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **31. května 2017**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Rozložení pracoviště lab. standu	2
2.1	Osazení motorů	2
2.2	Základní desky	2
2.3	Procesorové desky	2
2.4	Desky budičů	3
2.5	Desky výkonových měničů	3
2.6	Brzdná deska	3
3	Revize desky budice	5
3.1	Funkce saturační ochrany	5
3.2	Rozbor funkce desky budiče	6
3.2.1	Původní řešení zapojení saturační ochrany	6
3.2.2	Problémy původního zapojení saturační ochrany	8
3.2.3	Původní řešení zapojení napájecí části	9
3.2.4	Uvažovaná změna v zapojení napájecího obvodu	10
3.3	Nový návrh desky budičů	13
3.3.1	Uvažované změny v zapojení saturační ochrany	13
3.3.2	Zvolené řešení	17
4	Ověření funkce řídicí a silové části	21
4.1	Měření zpoždění signálu z mikroprocesoru na svorky stroje	21
4.2	Měření proudu motoru	24
4.3	Ověření funkce brzdné desky při reverzaci DC stroje	27
5	Zatěžovací zkouška systému, ověření funkce chlazení	28
6	Konstrukční řešení mechanických částí	30
6.1	Výroba plechů pod motory a lože elektroniky standu	30
6.2	Kompletace pracovišť	31
7	Závěr	32
	Literatura	34
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	36
	Seznam příloh	37

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Laboratorní stand	4
Obrázek 3.1 Princip funkce saturační ochrany	5
Obrázek 3.2 Původní podoba desky budiče použítá v kompletním prototypu.....	6
Obrázek 3.3 Schéma původního zapojení saturační ochrany	7
Obrázek 3.4 Průběh vybavení saturační ochrany obvodu ACPL333J (převzato z [5])	7
Obrázek 3.5 Schéma původního zapojení napájecího obvodu	9
Obrázek 3.6 Úprava maximální výstupní střídý (převzato z [6])	11
Obrázek 3.7 Průběhy u_{CT} a u_{OUTA} bez připojení R_{DT}	12
Obrázek 3.8 Průběhy u_{CT} a u_{OUTA} po připojení $R_{DT}=20k\Omega$	12
Obrázek 3.9 Schéma zapojení saturační ochrany se zenerovou diodou.....	14
Obrázek 3.10 Schéma zapojení saturační ochrany s TLV431	15
Obrázek 3.11 Napětí na saturační ochraně při $U_{cc} = 10V$	16
Obrázek 3.12 Napětí na saturační ochraně při $U_{cc} = 15V$	17
Obrázek 3.13 Napětí na Zenerově diodě a pinu saturační ochrany - výsledné zapojení	18
Obrázek 3.14 Výsledné schéma zapojení.....	19
Obrázek 3.15 Nová deska budiče	19
Obrázek 4.1 Naměřené zpoždění na obvodu budiče.....	22
Obrázek 4.2 Proudová cesta Avago - gate bez útlumu, či zpoždění.....	22
Obrázek 4.3 Měření doby zapínacího děje tranzistoru	23
Obrázek 4.4 měření doby vypínacího děje.....	23
Obrázek 4.5 detail délky dead time ve větvi A.....	24
Obrázek 4.6 Komutace PWM signálů obou větví.....	24
Obrázek 4.7 Detail návrhu desky výkonových obvodů - signál z čidla LEM	25
Obrázek 4.8 výstup čidla LEM a proud měřený proudovou sondou	26
Obrázek 4.9 Signál z čidla LEM na vstupu procesorové desky	26
Obrázek 4.10 Signál z čidla LEM po filtraci na procesorové desce	27
Obrázek 4.11 Ověření funkce brzdě desky.....	27
Obrázek 5.1 Naměřené průběhy oteplení při zatěžovací zkoušce - teplota okolí 27°C.....	28
Obrázek 5.2 Další prvky standu s významnými tepelnými ztrátami.....	29
Obrázek 6.1 Průběh realizace zbylých pracovišť	31

Seznam tabulek

Tabulka 3.1 Výhody a nevýhody použití zenerovy diody v zapojení saturační ochrany	14
Tabulka 3.2 Výhody a nevýhody použití TLV431 v zapojení saturační ochrany	17

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se bude zabývat laboratorním výukovým standem, který bude v budoucnosti sloužit pro potřebu výuky na ústavu UVEE.

Velkým úskalím mnohé laboratorní výuky, zvláště pak úloh s točivými stroji, bývá to, že pracoviště jsou velká a drahá. Na jednom měřicím pracovišti se poté v průběhu semestru musí vystřídat velké množství studentů. V praxi jsou většinou utvořeny velké pracovní skupiny a část studentů odchází z výuky aniž by se musela, nebo mohla aktivně zapojit. Vytvoříme-li však několik identických, velmi komplexních, kompaktních a finančně dostupných pracovišť můžeme výuku značně zefektivnit.

Doposud již existuje funkční prototyp takovéhoho pracoviště, který je postupně vyvíjen pracovníky a v rámci bakalářských a diplomových prací i samotnými studenty UVEE. Cílem projektu je vyrobit 8 identických pracovišť pro laboratorní výuku. K úspěšné finalizaci projektu je však zapotřebí znovu ověřit a otestovat funkčnost jednotlivých komponentů, případně provést revizi.

Tato práce se zabývá převážně revizí desky budiče výkonových tranzistorů a realizací pracovišť z konstrukčního hlediska. Dalším bodem je ověření funkce řídicí a silové části standu, v rámci kterého byla mapována cesta řídicích signálů z mikroprocesoru do výkonového stupně a opačně informace z proudového čidla do procesoru. Ověřena byla rovněž funkce chlazení celého systému provedením oteplovací zkoušky.

2 ROZLOŽENÍ PRACOVISTĚ LAB. STANDU

Laboratorní stand je vsazen do rámu z duralových profilů 45x45mm, který tvoří robustní konstrukci potřebnou k odolávání dynamickým silám v průběhu měření. Současně je samotná konstrukce využita i jako chladič pro moduly výstupních výkonových tranzistorů MOSFET.

2.1 Osazení motorů

V horní části je umístěno soustrojí asynchronního motoru s kotvou nakrátko a stejnosměrného motoru s permanentními magnety. Osy obou strojů jsou z bezpečnostních a mechanických důvodů spojeny pružnou spojkou ROTEX®. Pro účely přesného sledování polohy je na hřídeli asynchronního motoru v prostoru pro ventilátor osazen resolver od společnosti Atas Náhod. Pro dosažení dostatečného chlazení i po demontáži původního ventilátoru je nově instalován nízko-profilový BLDC ventilátor na 12V. Výhodou toho řešení je možnost dostatečného chlazení i při zatěžování v nízkých otáčkách motoru. Problematikou dimenzování parametrů použitých motorů se zabýval v dřívější práci Ing. Hudák viz [1]. V rámci budoucích inovací je možné osadit i jiné druhy motorů, jako například elektronicky komutovaný (EC) motor v provedení pro neharmonické buzení - BLDC, nebo harmonické ve formě PMSM - synchronního motoru s permanentními magnety.

2.2 Základní desky

Pro každý motor náleží na laboratorním standu jedna základní deska, sloužící k přenosu dat a rozvodu napájecího napětí pro další podružné desky. Přímo na základní desce je osazena procesorová deska, desky budičů výkonových tranzistorů MOSFET, 12-ti bitový převodník pro resolver a trojice napájecích obvodů. Přes 26-ti pinový konektor poté probíhá komunikace s přilehlou deskou silových obvodů.

2.3 Procesorové desky

Centrálním řídicím členem každé základní desky je deska procesorová. Jedná se o samostatně funkční již dříve vyvinutý celek, sloužící i v jiných zařízeních. Deska obsahuje digitální signálový procesor Freescale 56F8257, vlastní napájecí obvody, LED diody pro signalizaci provozních stavů, několik tlačítek pro základní možnosti ovládání, obvod přesné napěťové reference, konektory pro komunikaci a další podpůrné obvody.

2.4 Desky budičů

Každá základní deska je vybavena deskami budičů, ty jsou pro každý tranzistor ve výkonovém modulu samostatné. Základní deska pro asynchronní motor je tedy osazena 6ti budiči a část pro DC motor v současnosti 4mi, s možností osazení taktě 6ti kusů. Jedná se o robustní koncepční řešení umožňující budít tranzistory spínající zátěže s vysokým napětím. Napětí v meziobvodu měničů pro motory je pro řídicí mikroprocesorovou techniku příliš vysoké a je tedy nutno zaručit kvalitní galvanické oddělení. Řídicí napětí horních tranzistorů v můstcích je navíc plovoucí a vůči potenciálu GND se k 15V na řídicích elektrodách GATE ještě přičítá napětí na zátěži a na spodním sepnutém tranzistoru. Velmi vhodným řešením tedy je použití samostatných galvanicky oddělených zdrojů. Každá deska budiče tedy obsahuje miniaturní impulzní transformátor pracující na frekvenci přibližně 300kHz. Řídicí signály z procesoru jsou pak interně v budícím obvodu Avago ACPL333J odděleny od výkonové části pomocí optočlenů.

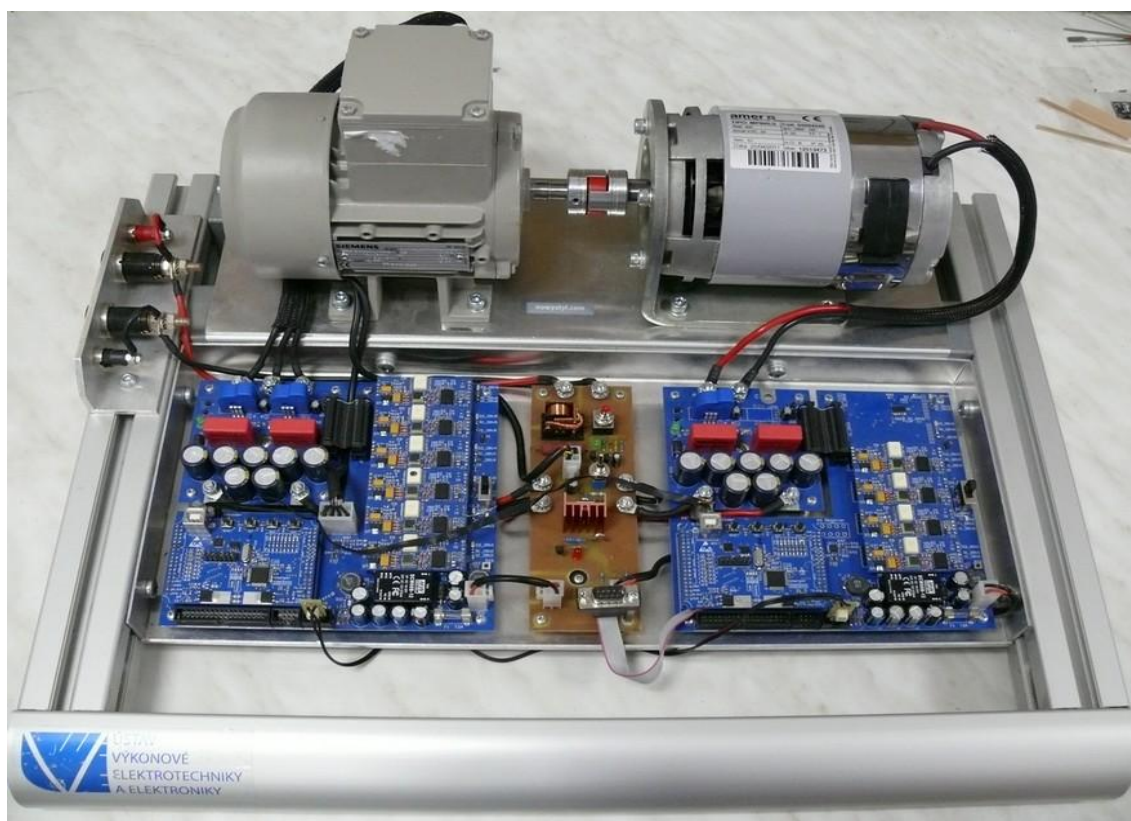
2.5 Desky výkonových měničů

Koncovým stupněm pro řízení každého motoru je výkonová deska osazená tranzistorovým modulem Semikron SK115MD10 integrující 3 půlmůstky. Výhodou užití tranzistorových modulů je krom jiného kvalitní integrované tepelně vodivé a elektricky nevodivé spojení všech tranzistorů do jediné bezpotenciálové teplosměnné plochy [3]. Celý modul je přišroubován na hliníkové lože elektroniky standu, které slouží jako chladič. Na výkonové desce se také nachází kondenzátory stabilizující napětí v meziobvodu a proudová čidla LEM. Deska pro asynchronní motor má osazená 2 čidla, deska pro DC motor pouze jedno.

2.6 Brzdná deska

Kromě výše zmíněných desek pro každý motor obsahuje stand také jednu tzv. brzdnou desku. Deska je určena převážně k ochraně napájecích obvodů jednotlivých pracovišť. Jednak obsahuje funkci soft startu pro omezení proudových rázů při nabíjení kondenzátorů v meziobvodu bezprostředně po zapnutí, dále pak obsahuje brzdný tranzistor řízený napětíovou referencí, nastavenou tak aby v případě překročení napětí v meziobvodu 35V zamezil přepětí. Jedná se o tranzistor IRFP460 v pouzdře TO-247 vhodném pro velké tepelné ztráty. Jelikož samotné napájecí napětí standu bude externě nastaveno na méně než 35V, případné přepětí se předpokládá převážně vlivem rekuperace motorů. Pro uvědomění obsluhy je činnost brzděného tranzistoru signalizována pomocí červené LED. Případné přepětí vlivem rekuperace by trvalo pouze zlomky, či jednotky sekund, po dobu nadměrných otáček soustrojí. Pro dostatečný odvod tepla je však přesto pouzdro brzděného tranzistoru připevněno na hliníkové lože elektroniky standu.

Jako poslední je na desce umístěn přepínač pro změnu otáček ventilátoru v asynchronním motoru. Regulace otáček je řešena pomocí nastavitelného stabilizátoru LM317KC. Návrhem této desky se zabýval Ing. Ondřejček ve své diplomové práci viz [2].



Obrázek 2.1 Laboratorní stand

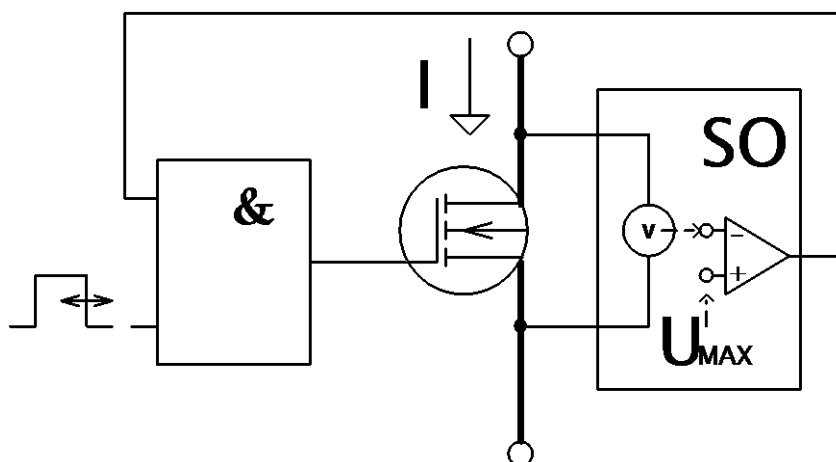
3 REVIZE DESKY BUDICE

V průběhu testování komplexní funkčnosti a implementace prvních měřících úloh do laboratorního standu, docházelo k potížím s vybavováním hardwarové saturační ochrany. Největší proudovou zátěží na pracovišti z hlediska jmenovitých parametrů je DC motor, s jmenovitým proudem 23A [1]. V mnoha aplikacích jsou však motory běžně krátkodobě přetěžovány a po laboratorním standu chceme aby tyto aplikace byl schopen simulovat. Proto byl také na výkonové desce použit modul tranzistorů s jmenovitými proudy 80A. Saturační ochrana však vybavovala již při proudu 25A a méně.

3.1 Funkce saturační ochrany

Saturační ochrana slouží k ochraně tranzistorů proti zničení tepelnými ztrátami. Funguje na základě kontinuálního měření napětí mezi Drainem a Sourcem tranzistoru po dobu jeho sepnutí. Vysoké napětí na tranzistoru po odeznění přechodových dějů signalizuje nebezpečně vysoké ztráty. V takovém případě vybavuje saturační ochrana a to z principu ze 2 základních důvodů :

- 1) Z důvodu nedostatečného napětí na řídicí elektrodě GATE nebyl tranzistor plně sepnut do saturace. Důsledkem čehož má vyšší odpor v sepnutém stavu $R_{DS(ON)}$. Na vyšším odporu v sepnutém stavu vznikají vyšší Jouleovy ztráty vedením a hrozí tepelná destrukce tranzistoru.
- 2) Z důvodu nadproudu vznikají na tranzistoru nadměrné ztráty i při sepnutí do saturace. Ochrana opět vybavuje aby zamezila tepelné destrukci.



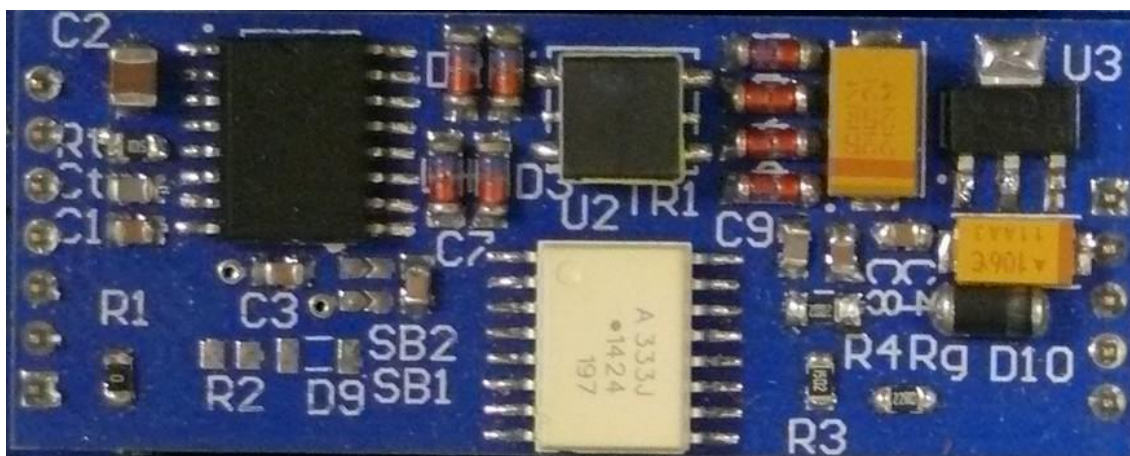
Obrázek 3.1 Princip funkce saturační ochrany

3.2 Rozbor funkce desky budiče

Deska budiče se z důvodu ochrany řídicí elektroniky dělí na dvě základní části. Na část řídicích signálů s galvanickým spojením se zbytkem elektroniky a na část galvanicky oddělenou.

Se zbytkem základní desky je spojena část obsahující obvod kontroléru PWM, který zajišťuje buzení primárního vinutí impulzního transformátoru. Dále jsou pomocí galvanicky spojené části přiváděny signály na obvod Avago ACPL333J. Impulzní transformátor, stejně tak jako obvod 333J tvoří dělící rovinu mezi galvanicky spojenou a oddělenou částí desky.

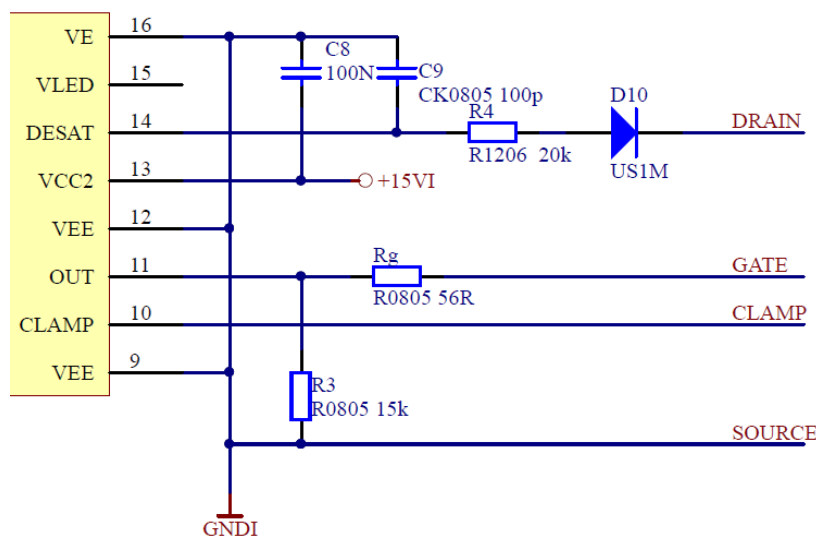
Oddělená část je napájena z impulzního transformátoru, jehož výstup je usměrněn můstkovým usměrňovačem. Napětí je dále vyhlazováno kondenzátory a jeho úroveň je stabilizována obvodem LM2937 na přibližně 15V. Z vyhlazeného a stabilizovaného napětí je napájena výstupní část obvodu ACPL333J. Ta se stará o kvalitní sepnutí tranzistoru, obsahuje saturační ochranu a ochranu proti podpětí. Ochrana proti podpětí vyřadí z činnosti obvodu buzení tranzistoru při napájecím napětí 11V. Saturační ochrana má komparační úroveň pro vybavení typ. 6,6V[4].



Obrázek 3.2 Původní podoba desky budiče použitá v kompletním prototypu

3.2.1 Původní řešení zapojení saturační ochrany

Původní zapojení saturační ochrany spočívalo na poměrně jednoduchý obvod. Na pin 14 saturační ochrany - DESAT je proti zemi připojena kapacita C_9 sloužící ke zpožděnému vybavení. Na rezistoru R_4 se předpokládá úbytek napětí 5V při průchodu proudu 250uA z pinu 14. Dioda D_{10} chrání pin 14 proti vysokému napětí v meziobvodu a zároveň přispívá do smyčky saturační ochrany úbytkem 0,6V. K vybavení ochrany by tedy mělo dojít při napětí U_{DS} přibližně 1V viz. (3.2) dále.

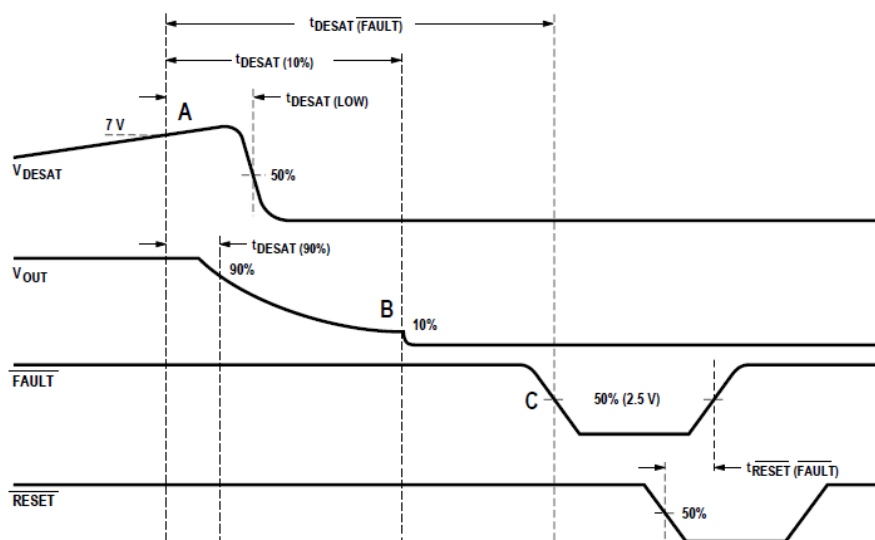


Obrázek 3.3 Schéma původního zapojení saturační ochrany

Vybavovací úroveň saturační ochrany byla měřením určena na testovaném kusu budiče přibližně 7V a dodává - li proudový výstup pinu 14 (viz. datasheet [4]) 250μA, pak opoždění vybavení ochrany vlivem C_9 je :

$$t_{C9} = \frac{C_9 \cdot U_{thDes}}{I_{Des}} = \frac{100 \cdot 10^{-12} \cdot 7}{250 \cdot 10^{-6}} = 2,8 \mu s \quad (3.1)$$

přičemž vnitřní zpoždění proudového zdroje pinu 14 je další 1μs. Obvod ACPL333J obsahuje také funkci tzv. soft turn-off, sloužící k zpomalení vypínacího děje při vybavení saturační ochrany. Tato funkce omezuje přepětí na parazitních indukčnostech v obvodu při vypínání nadproudového stavu. Průběh vypínacího děje zobrazuje obrázek 3.4.



Obrázek 3.4 Průběh vybavení saturační ochrany obvodu ACPL333J (převzato z [5])

Vypínací čas tranzistoru MOSFET při kapacitě hradla 10nF $t_{DESAT(10\%)}$ je dle datasheetu [4] maximálně 3μs. Celkově by tedy nadproudový stav měl být vypnut do 7μs.

Odpor R_4 byl použit o hodnotě 20kΩ, tak aby při protékání proudu 250μA z pinu 14 tvořil úbytek 5V. Uvažujeme-li napětí 0,6V na diodě D_{10} potom napětí na tranzistoru potřebné pro vybavení saturační ochrany bude podle 2.KZ :

$$U_{TRthDes} = U_{thDes} - R_4 \cdot I_{Des} - U_{D10} \quad (3.2)$$

$$U_{TRthDes} = 6,6 - 20 \cdot 10^3 \cdot 250 \cdot 10^{-6} - 0,6 = 1V$$

Tranzistory MOSFET v modulu SK115MD mají dle [3] odpor v sepnutém stavu $R_{DS(on)}$ za tepla(125°C) 13,5 mΩ a za 25°C 7,5mΩ. K vypnutí budičů zapůsobením saturační ochrany by tedy dle Ohmova zákona mělo dojít :

$$I_{TRth(25^\circ C)} = \frac{U_{TRthDes}}{R_{DS(on)25^\circ C}} = \frac{1}{7,5 \cdot 10^{-3}} = 133 \text{ A} \quad (3.3)$$

$$I_{TRth(125^\circ C)} = \frac{U_{TRthDes}}{R_{DS(on)125^\circ C}} = \frac{1}{13,5 \cdot 10^{-3}} = 74 \text{ A} \quad (3.4)$$

U použitého tranzistorového modulu je udáváný maximální trvalý proud za studena 80A. Maximální špičkový proud 120A při 80°C po dobu menší 1ms. Vzhledem k předpokládané rychlosti vypínání nadproudu saturační ochranou lze tedy toto nastavení považovat za vhodné.

3.2.2 Problémy původního zapojení saturační ochrany

Při testování původní verze zapojení byla zjištěna značná nespolehlivost. Analýzou chování obvodu, pokusnými měřeními a po pečlivém nastudování dokumentace k obvodu ACPL333J byly stanoveny následující problémy stávajícího zapojení:

- Výrobce udává, že proud I_{Des} tekoucí z pinu 14 se může pohybovat v mezích 0,13 - 0,33mA. Nastavený úbytek napětí pomocí R_4 je poté určen s velmi žalostnou přesností. Proud 250 μA je navíc pravděpodobně příliš nízký aby se na něj superponované okolní rušení dalo zanedbat.
- Komparační úroveň U_{thDes} se může dle kusu a okolní teploty pohybovat v mezích 6 -7,5V.
- Kapacita kondenzátoru $C_9 = 100\text{pF}$ není nezbytná, může být i nižší

V extrémním případě by proudový zdroj poskytoval nejnižší tolerovaný proud 130μA a vybavovací komparační napětí by bylo až udávaných 7,5V. Použitím

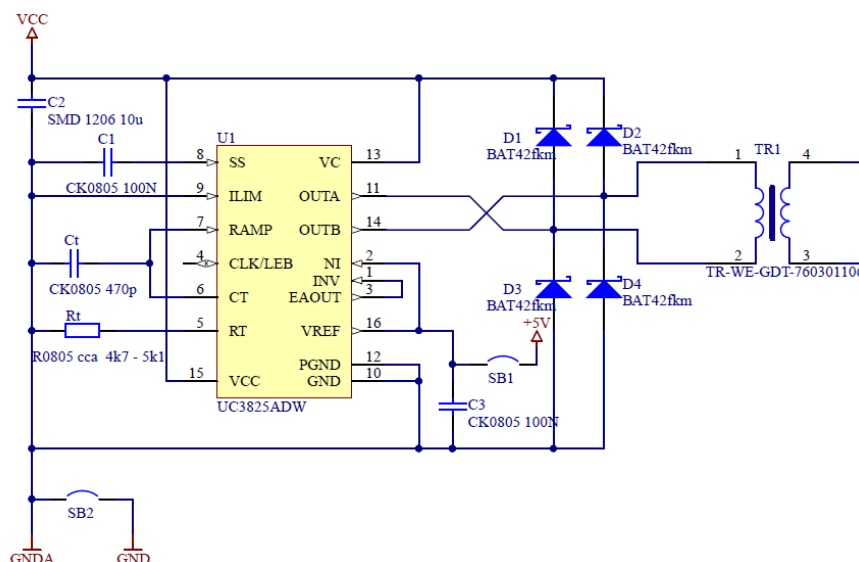
vzorců (4.1),(4.2) a (4.3) vypočteme, že ochrana by zapůsobila až při proudu 573A a to po čase minimálně 10 μ s. V opačném případě je možné, že k blokování budičů ochranou dojde, aniž by sepnutými tranzistory protékal jakýkoliv proud.

Z výše zmíněných důvodů bylo nezbytně nutné najít nový, přesněji definovaný způsob nastavení ochrany.

3.2.3 Původní řešení zapojení napájecí části

Při testování původní verze budičů, docházelo i přes mnohé předchozí úpravy stále k zahřívání napájecího obvodu UC3825. Situaci příliš nezměnilo ani použití zaměnitelného obvodu MC33025DWR2G od společnosti ON SEMICONDUCTOR. Provozní teplota na pouzdře obvodu dosahovala stále 40 až 45°C. Zmíněná teplota není kritická, i přesto však bylo zapojení napájecí části znovu zkontrolováno.

Napájecí část desky budičů prošla za dobu vývoje standu velkým množstvím změn. Po poslední změně transformátoru docházelo k vyššímu zahřívání napájecího obvodu který byl posléze již 3x zaměněn za jiný. V současné verzi je použitý transformátor GDT 760301106 od společnosti WÜRTH ELEKTRONIK. Ten je primárně navržen pro přímé buzení hradel výkonových tranzistorů. Paradoxně je u něj proto požadavek aby došlo k rychlému nasycení magnetického obvodu a bylo tak umožněno rychlé spínání tranzistorů s malými ztrátami magnetizačním proudem. Tato skutečnost však komplikuje jeho použití v klasické topologii DC/DC měniče. Transformátor se velmi rychle přesycuje a je tak zapotřebí volit velmi krátké spínací periody.



Obrázek 3.5 Schéma původního zapojení napájecího obvodu

Na obrázku 3.5 je schéma zapojení napájecí části desky budičů. Kondenzátor C₂ složí k stabilizaci napájecího napětí, C₁ napájený vnitřním zdrojem proud 9 μ A

zajišťuje časování funkce soft-startu. Kondenzátor C_t společně s rezistorem R_t nastavují časovací frekvenci obvodu, potažmo spínání transformátoru. Spínací frekvence je nastavena na přibližně 300kHz se záměrem omezení přesycování transformátoru. Diody $D_1 - D_4$ slouží k odlehčování integrovanému obvodu od překmitů vlivem spínání indukčnosti transformátoru. Kondenzátor C_3 dodatečně stabilizuje interní referenční napětí.

Připojením referenčního napětí z pinu 16 na pin 2 nastavujeme horní komparační úroveň pro regulaci spínací střidy transformátoru. Zapojením výstupu zesilovače odchylky (pin 3) zpět na invertující vstup (pin 1) dojde k blokování regulační funkce a obvod tak na výstupu vytváří nejvyšší možnou střidu, tedy 45% viz datasheet [6]. Skutečná střida při zapojení s dříve použitým obvodem UC3825 dosahovala až 48 %.

Pokud by docházelo k přesycování magnetického jádra spínaného transformátoru, docházelo by vlivem zvýšeného magnetizačního proudu k vyššímu zatěžování obvodu MC33025. Maximální syčení použitého transformátoru je dáno konstantou ET , která se získá jako výsledek integrálu přiloženého napětí na primární vinutí za čas t .

$$ET = \int_0^t u(t)dt \quad (3.5)$$

Považujeme - li připojené napětí za přibližně konstantní, lze konstantu vypočítat pouze jako :

$$ET = U_P \cdot t_{PON} \quad (3.6)$$

Udává se obvykle v jednotkách $[V\mu s]$ a udává tedy za jaký čas dojde k nasycení magnetického obvodu impulzního transformátoru při určitém napětí přivedeném na primární vinutí. Konstanta ET pro použitý transformátor je dle datasheetu [7] rovna $30,2V\mu s$. Známe - li napájecí napětí, uvedenou konstantu pro maximální syčení a uvažovanou střidu spínání můžeme určit minimální spínací frekvenci při které nebude docházet k přesycování podle :

$$f_{min} = \frac{U_P \cdot s}{ET} = \frac{18 \cdot 0,48}{30,2 \cdot 10^{-6}} = 286,093 \text{ kHz} \quad (3.7)$$

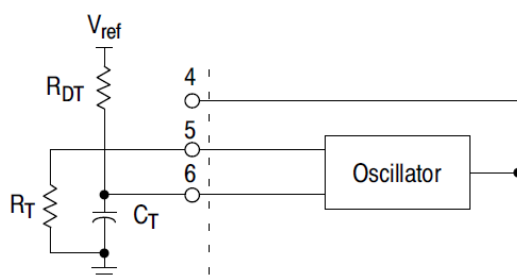
3.2.4 Uvažovaná změna v zapojení napájecího obvodu

Z výpočtu dle (3.7) vyplývá, že za střidy 0,48 je nastavená frekvence 300 kHz dostačující k tomu aby k přesycování nedocházelo. Lineárně s rostoucí spínací frekvencí rostou spínací ztráty, zároveň obvod ACLP333J na sekundární straně transformátoru potřebuje ke své funkci ve střední hodnotě pouze desetiny wattu

příkonu. Nabízelo se tedy zkoumat možnost snížení spínací frekvence se současným snížením spínací střídý.

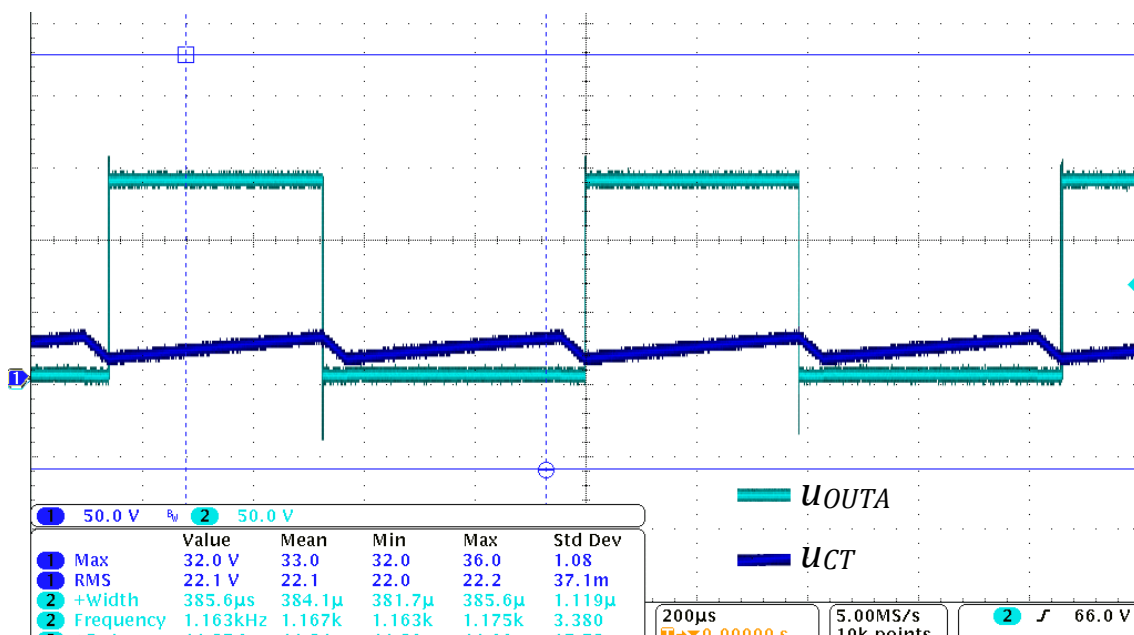
V použitém zapojení, kdy je regulační logika obvodu blokována, je nejjednodušším způsobem snížení střídý změna poměru nabíjecího a vybíjecího proudu časovacího kondenzátoru C_t . Výstupní piny 11 a 14 (OUTA a OUTB viz obrázek 3.5) spínají postupně na zátěž napětí V_c . Toto spínání je řízeno náběžnou hranou napětí u_{Ct} .

OUTA a OUTB se ve své funkci střídají. Každý pin 11 i 14 tedy spínají jeden se sudou druhý s lichou náběžnou hranou u_{Ct} . Vypínání probíhá se sestupnou hranou, což samo o sobě definuje maximální střidu $s_{max} < 0,5$. Dobu nabíjení určuje odpor R_t který nastavuje proud interního proudového zrcadla napájecího C_t . Vybíjecí proud je fixně určen jako $10 \times I_{RT}$. Pokud však zrychlíme nabíjení C_t z jiného zdroje než pouze z interního proudového zrcadla, změní se poměr nabíjecího a vybíjecího času což v konečném důsledku ovlivní maximální střidu na výstupních pinech OUTA a OUTB. Tohoto lze docílit zapojením odporu mezi pin 16 V_{ref} a C_t . Ze zdroje referenčního napětí lze bezpečně odebírat proud až 20 mA [6].

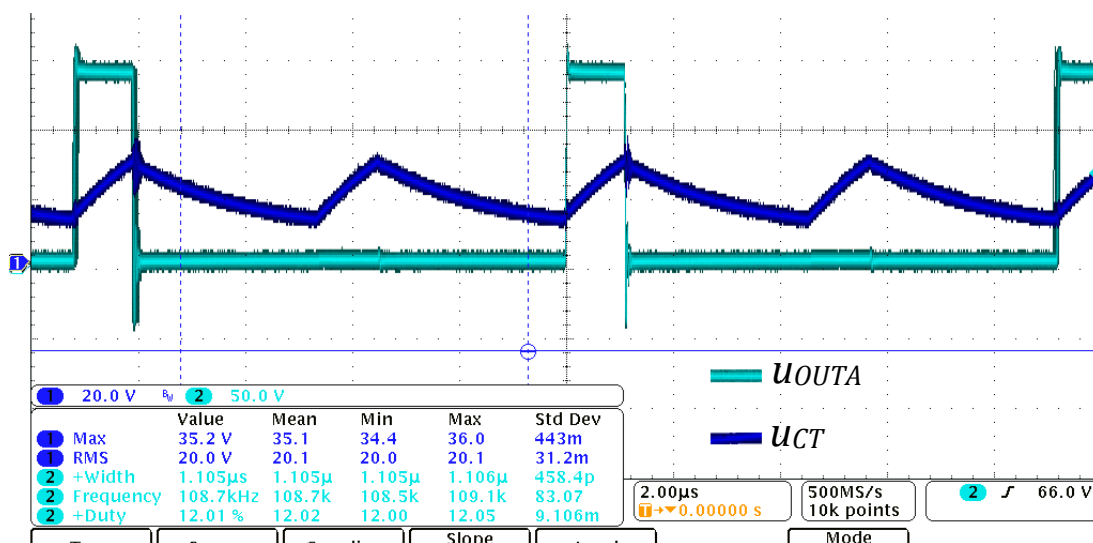


Obrázek 3.6 Úprava maximální výstupní střídý (převzato z [6])

Dle schématu na obrázku 3.6 byla realizována pokusná úprava zapojení a byla ověřena možnost regulace střídý. Bylo ověřeno že tímto způsobem jde regulovat maximální výstupní střidu v rozsahu 10 - 45 %. Na vědomí je však nutné vzít, že se touto úpravou logicky mění i časovací frekvence obvodu, nikoliv pouze střída. Na obrázku 3.7 jsou zachyceny průběhy napětí u_{Ct} (tmavě) a výstupního napětí u_{OUTA} (světle). $C_T = 470 \text{ pF}$; $R_T = 20 \text{ k}\Omega$. Obrázek 3.8 zachycuje též průběhy po připojení odporu $R_{DT} = 3 \text{ k}\Omega$.



Obrázek 3.7 Průběhy u_{CT} a u_{OUTA} bez připojení R_{DT}



Obrázek 3.8 Průběhy u_{CT} a u_{OUTA} po připojení $R_{DT}=20k\Omega$

V rámci pokusného měření se snížením spínací frekvence a střídý impulzního transformátoru došlo k znatelnému snížení povrchové teploty obvodu MC33025. Celkové ustálené oteplení vůči okolní teplotě z 22 na 15°C. Měření proběhla za shodného napájecího napětí 15 V.

Dle vzorce (3.5) bylo ověřeno, že k přesycování transformátoru by ani za stávajícího nastavení nemělo docházet. Naměřené oteplení však není celkově příliš vysoké a snížení střídý a spínací frekvence přineslo pouze částečné zlepšení.

K oteplování docházelo dokonce i bez připojené zátěže na svorky 11 a 14 a to přibližně o 9°C. Výrazné snížení spínací střídy by znamenalo nutnost použití LC filtru na výstupu transformátoru. Vzhledem k frekvenci stále okolo 100 kHz by jeho kompaktní realizace na desce budiče byla možná a celkově by nahradil nyní použitý stabilizátor LM2937. Přínos této změny na oteplení obvodu MC33025 by však nebyl tak vysoký, jako se při předchozí úvaze očekávalo.

3.3 Nový návrh desky budičů

Analýzou zapojení původní verze budičů byly zhodnoceny vlastnosti současného zapojení. Byl nalezen způsob, jak by bylo možné upravit napájecí část desky pro částečné snížení tepelných ztrát. Nejpodstatnější a nutnou změnou je však úprava zapojení saturační ochrany.

3.3.1 Uvažované změny v zapojení saturační ochrany

V kapitole 3.2.2 byly popsány mnohé nedostatky dosavadního zapojení saturační ochrany. Pro přesnější nastavení vybavovací úrovně saturační ochrany byly v zásadě uvažovány 2 verze.

- Se Zenerovou diodou
- S nastavitelnou napěťovou referencí TLV431

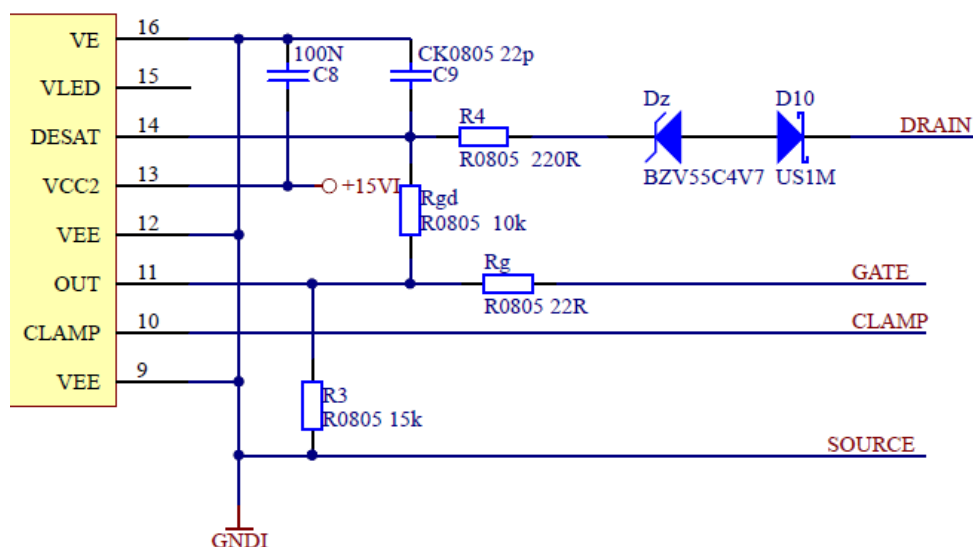
3.3.1.1 Řešení se Zenerovou diodou

Jako jedno z vhodných řešení pro přesnější nastavení vybavovacího proudu se jeví nahrazení odporu R4 Zenerovou diodou. Jedná se o jednoduché a levné řešení. Jelikož je však rozptyl parametrů integrované saturační ochrany velký viz kap. 3.2.2, bude pro přesné nastavení nutné volit pro každou desku budiče Zenerovu diodu s vhodným závěrným napětím. V rámci dostupných hodnot napětí Zenerových diod je možnost nastavit ochranu s přesností na desítky ampér. Pro přesnější doladění bude nutné zapojit sériovou kombinaci Zenerovy diody a odporu pro dodatečný napěťový úbytek.

Z důvodu rychlejšího nabíjení parazitních kapacit, nezávislosti na proměnných parametrech zdroje proudu saturační ochrany a nižší náchylnosti k rušení se počítá se zapojením pull-up odporu. Bez ohledu na výše uvedené musí být také zajištěn dostatečný proud zenerovou diodou pro dosažení oblasti stabilního zenerova napětí. Jako nejvhodnější zapojení se jeví odpor mezi výstupem pro buzení (pin 11) mosfetu pinem saturační ochrany (14). Napětí na pinu saturační ochrany tak bude uměle navyšováno pouze v době sepnutí tranzistoru.

Na obrázku 3.9 je schéma zapojení se zenerovou diodou. Při zapojení pull-up odporu R_{gd} na výstupní napětí pro buzení mosfetu, které koresponduje s

napájecím napětím se celé nastavení saturační ochrany stane závislé na napájecím napětí V_{cc} .



Obrázek 3.9 Schéma zapojení saturační ochrany se zenerovou diodou

Tabulka 3.1 Výhody a nevýhody použití zenerovy diody v zapojení saturační ochrany

VÝHODY	NEVÝHODY
Velmi rychlá odezva zenerovy diody	Nutnost osazování více typů dle napětí
Jednoduchost, robustnost	Závislost na napětí při doladění odporem R4
Cena	
Prostorově nenáročné zapojení	

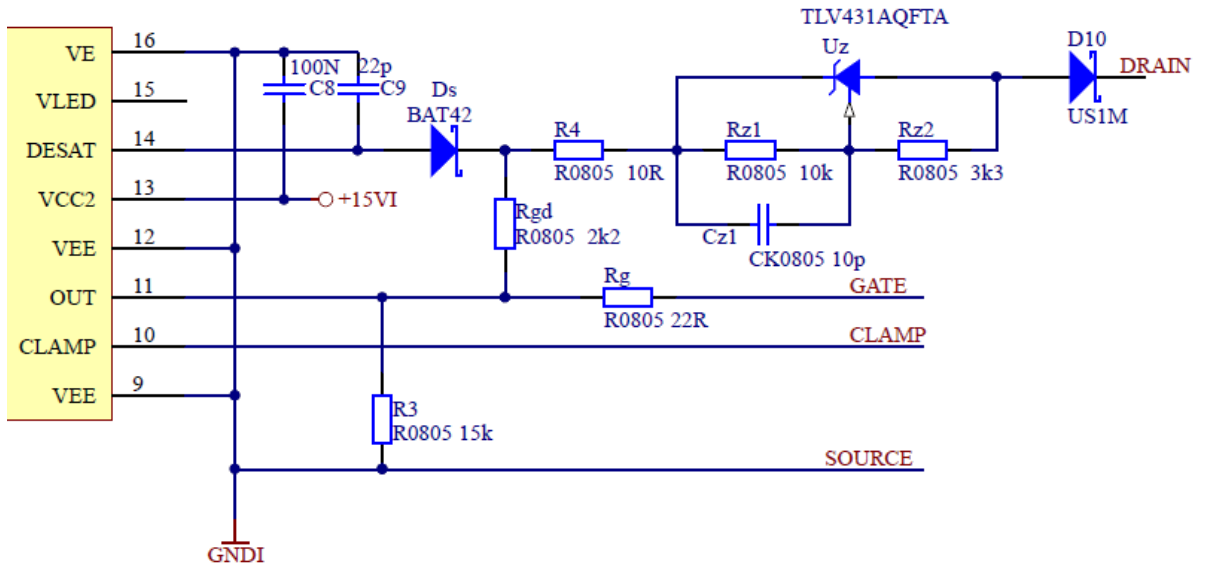
Poznámka:

Při následném testování zapojení s obvodem TLV431 byl nalezen přínos v doplnění zapojení o diodu D_s viz obr. 3.10. Dodatečně byla tímto způsobem zapojena dioda také při pokusném měření se Zenerovou diodou. Výsledkem bylo nastavení stabilního úbytku na Zenerově diodě již za dobu 80ns, což je řádově kratší čas než opoždění aktivace samotného proudového zdroje I_{Des} , nutného k funkci saturační ochrany.

3.3.1.2 Řešení s nastavitelnou referencí TLV431

Pro komplexnější možnost nastavení byla zkoumána možnost použití nastavitelné napěťové reference TLV431. Jedná se o integrovaný obvod dostupný v SMD pouzdře SOT23 mající pouze 3 vývody (anodu, katodu a referenční pin). Obsahuje vnitřní napěťovou referenci 1,24 V, celkové napětí mezi anodou a katodou lze však nastavovat v rozsahu právě od 1,24 V až po 18 V. Konstantní nastavené napětí je

posléze udržování v rozsahu procházejících proudů 0,08mA - 15mA. Po zapojení několika prototypních obvodů bylo stanoveno výsledné funkční zapojení dle schématu na obrázku 3.10.



Obrázek 3.10 Schéma zapojení saturační ochrany s TLV431

Odpory R_{z1} a R_{z2} nastavují napětí na TLV431. Dle žádaného napětí je jejich hodnoty nutno určit dle vztahu (3.8)[7] :

$$U_z = U_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_{z1}}{R_{z2}}\right) \quad (3.8)$$

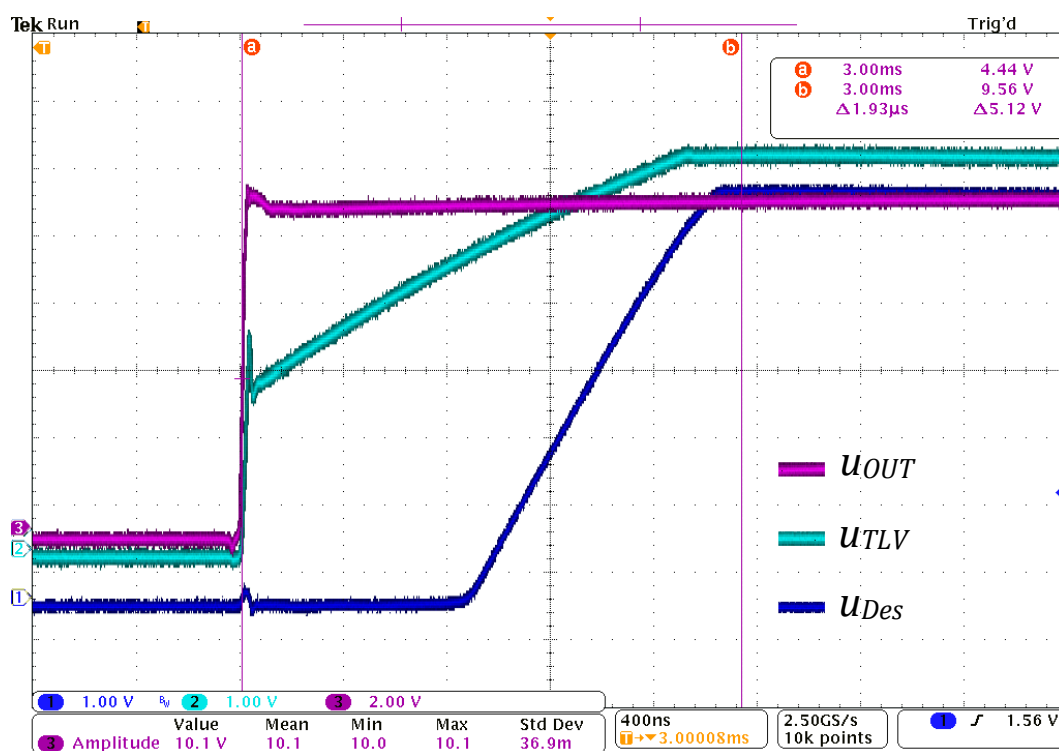
přičemž referenční napětí U_{ref} je pro již výše zmíněných 1,24 V. Jeden z odporů R_{z1} a R_{z2} se volí, druhý dopočítá. Celkově se tyto odpory volí s ohledem na to, aby proud který jimi bude procházet byl mnohonásobně menší než proud jdoucí přes samotné TLV431. Odpory však nesmí být příliš vysoké jelikož pin reference vyžaduje proud alespoň $I_{ref} = 0,5 \mu A$. Obecně se volí odpory menší než 100 kΩ.

Kondenzátor C_{z1} byl osazen jelikož pomáhá snižovat překmit napětí, který se přirozeně vyskytuje při počátečním průchodu proudem obvodem TLV.

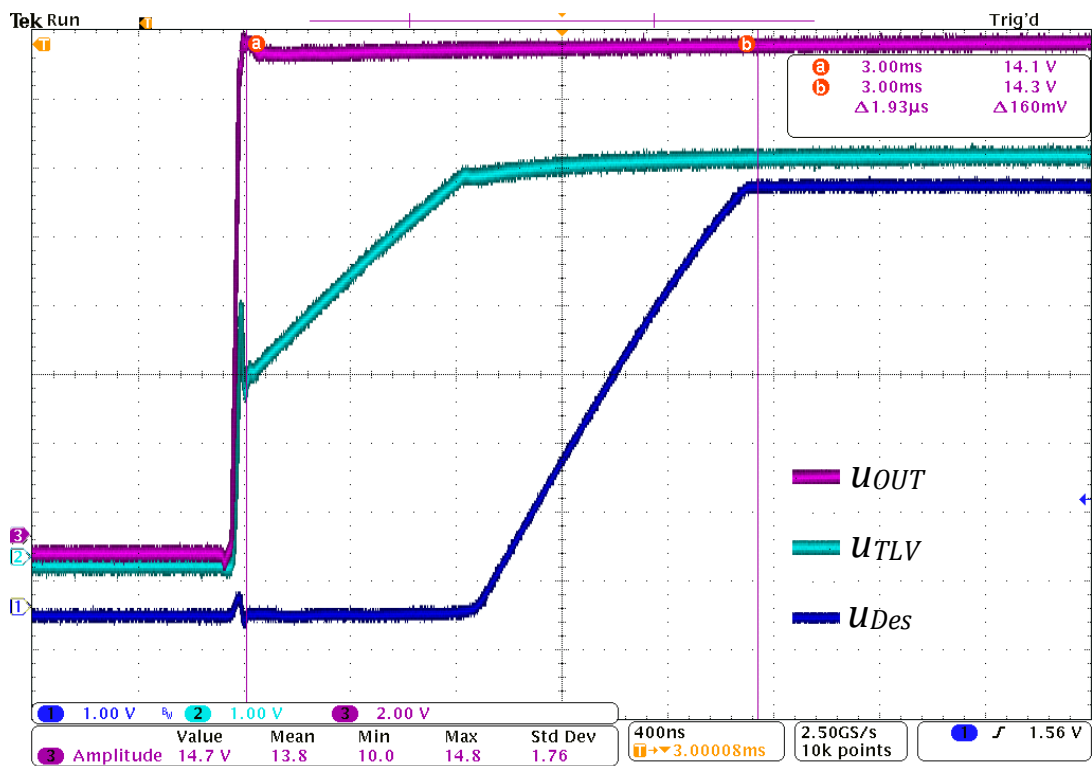
Při prvních testováních tohoto zapojení nebyla zapojena dioda D_s . Jelikož se však proudový zdroj uvnitř saturační ochrany obvodu ACPL333J opoždí o 1 μs za výstupem OUT (pin11), procházel po tuto dobu proud přes odpor R_{gd} zpět do pinu 14 a nikoliv do TLV. Výsledkem byl prakticky negativní vliv odporu R_{gd} na celé zapojení, jelikož proud tekoucí do pinu saturační ochrany nijak neurychluje ustálení napětí na obvodu TLV a následně dále zpomaluje samotné spuštění proudového zdroje I_{des} . Po zapojení diody D_s nyní musí proud okamžitě po sepnutí výkonového výstupu pro buzení mosfetu téci do TLV. Tím se za doprovodu

malého překmitu prvně nastaví napětí na TLV a v okamžiku spuštění saturační ochrany se již pomocí vnitřního proudového zdroje otevře dioda D_s .

Rychlost nastavení TLV závisí vlivem nabíjení kapacit na procházejícím proudu, proto také byla hodnota odporu R_{gd} snížena až na současných 2,2 k Ω . Při méně jak přibližně 11V napájecího napětí je obvod ACLP333J blokován podpětíovou ochranou. V současném nastavení však platí že při napájecím napětí od 10V výše se saturační ochrana přes diodu D_s otevírá do již stabilně nastaveného napětí na TLV viz obrázky 3.11 a 3.12, kde průběh budícího napětí pro tranzistor (kanál 3) - fialově, napětí na TLV včetně zapínacího překmitu (kanál 2) - světle modře, napětí na pinu saturační ochrany (kanál 1) tmavě modře.



Obrázek 3.11 Napětí na saturační ochraně při $U_{cc} = 10V$



Obrázek 3.12 Napětí na saturační ochraně při $U_{cc} = 15V$

Tabulka 3.2 Výhody a nevýhody použití TLV431 v zapojení saturační ochrany

VÝHODY	NEVÝHODY
Nezávislost na napájecím napětí	Komplikovanější nastavení
Variabilní napětí	Prostorově náročnější zapojení
Velmi přesné nastavení saturační ochrany	Možnost vzniku popř. zesílení rušení (jedná se o OZ)

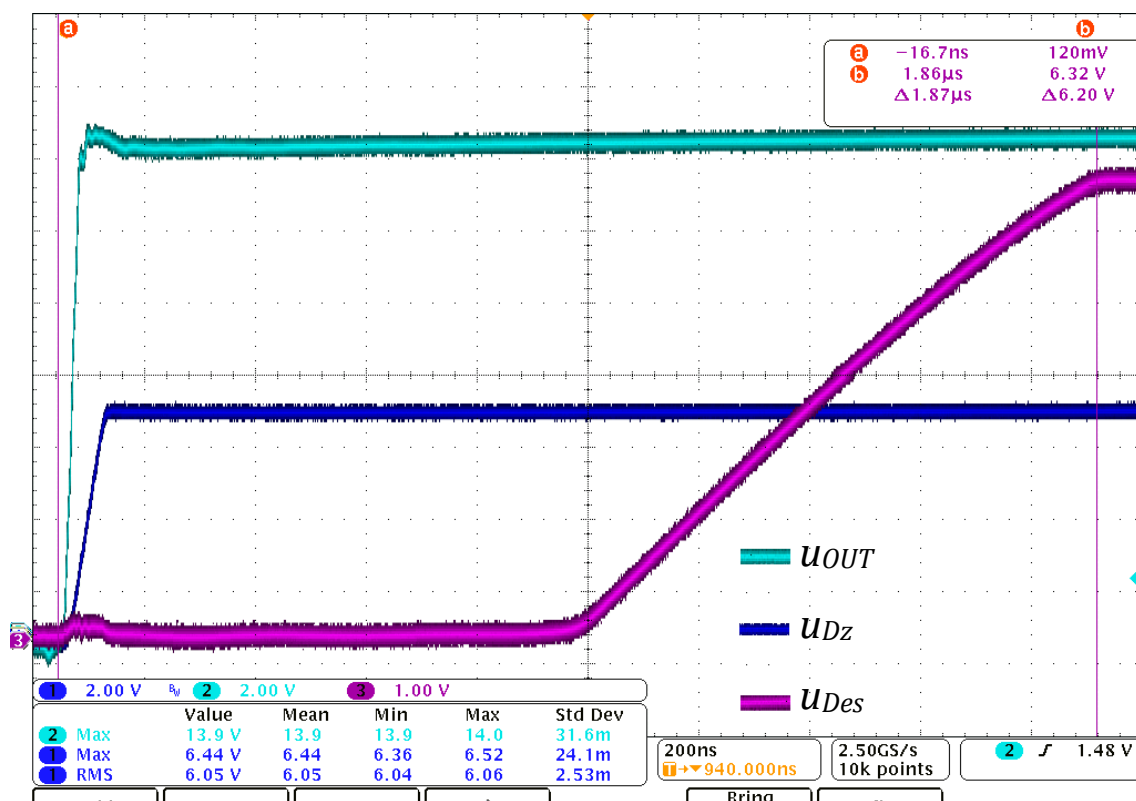
3.3.2 Zvolené řešení

Přestože zapojení s obvodem TLV431 poskytuje zdánlivě mnohem přesnější možnost nastavení saturační ochrany, bylo jako vhodnější řešení nakonec zvoleno zapojení se zenerovou diodou. Důvody pro toto řešení vycházejí ze sumarizací v tabulkách 3.1 a 3.2 výše.

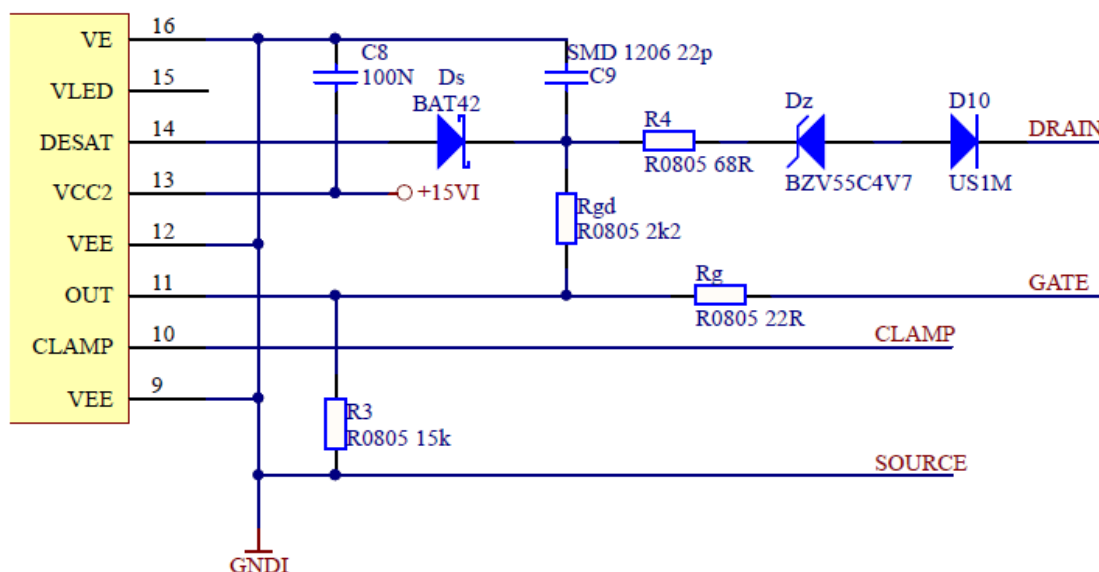
U obou z výše diskutovaných obvodových řešení bude pro přesné nastavení stále nezbytné doladění všech kusů jednotlivě. Obě řešení byla dovedena do fáze, kdy svojí rychlostí nezpomalují vybavení ochrany, které je nyní převážně dáno vnitřním zpožděním samotného proudového zdroje saturační ochrany.

Na obrázku 3.13 jsou naměřené průběhy na zapojení, se kterým bude nadále počítáno. Tmavě modře je průběh napětí na Zenerově diodě otevírané proudem přes odpor R_{gd} z pinu 11 (out) průběh napětí na tomto pinu je světle modře. Díky diodě D_s viz obrázek 3.14, již proud z pinu 11 nemůže téci zpět do pinu 14 a Zenerova dioda je tak otevřena tímto proudem za necelých 100ns. Proud I_{Des} se opoždí přesně $1\mu s$ za výstupním signálem pro hradlo mosferu a začíná otvírat diodu D_s .

Je nezbytné připomenout, že proud I_{Des} je velmi malý a proto fialový průběh (tedy napětí na pinu 14) je při tomto měření velmi zatížen kapacitou měřící sondy. Dioda BAT42 má dle datasheetu [9] kapacitu 7 pF, použitá sonda 13 pF. Kondenzátor C_9 pro opoždění vybavení ochrany při měření nebyl osazen. Bez osazení tohoto kondenzátoru je tedy předpokládán čas nastavení ochrany $1\mu s$ opoždění, + $0,2\mu s$ na otevření D_s (viz (3.1)). Pod tento čas není možné s použitým obvodem budiče ochranu dále zrychlit. Její opoždění je nadále možno plynule nastavovat osazením C_9 .



Obrázek 3.13 Napětí na Zenerově diodě a pinu saturační ochrany - výsledné zapojení



Pro toto nově zvolené zapojení desky budiče byl vytvořen nový návrh desky plošných spojů. Tento návrh byl poptán u stejné společnosti, kde byla vyrobena předchozí verze budičů, nyní osazených v prototypním pracovišti. Na obrázku 3.15 je zobrazen náhled nové DPS budiče.

V novém návrhu nebyly provedeny žádné obvodové změny na straně napájecí části desky budiče diskutované v kapitole 3.2.4 Současné zapojení lze považovat za funkční a implementace navržených změn tedy není nezbytná.

Pokud by však v budoucnu bylo potřebné snížit energetickou náročnost budiče, či omezit ztrátové teplo lze postupovat navrženou cestou. Z tohoto ohledu současné zapojení stále není ideální. Lineární stabilizátory, mezi které se řadí i použitý LM2937 potřebují pro svoji spolehlivou funkci určitý minimální rozdíl

vstupního a výstupního napětí, z tohoto důvodu je i napájení desky budiče nyní realizováno 18ti volty. Pokud by bylo použito výše navržené řešení mohlo by být napájecí napětí mírně sníženo, to by vedlo k dalšímu možnému snížení spínací frekvence vyplývajícího ze vztahu (3.7). Po nahrazení lineárního stabilizátoru, který rozdíl mezi vstupním a požadovaným výstupním také maří v teplo, by tedy došlo celkově k omezení tepelných ztrát na vícero místech v obvodu. Aby nemuselo být napájecí napětí ještě více než současných 18V byl volen takzvaný LDO (Low Dropout) stabilizátor, který je poměrně drahý. Za poslední přínos lze pak tedy uvést, že použití LC filtru jehož parametry lze dopočítat dle literatury docenta Patočky [10] kapitola 22, vychází finančně oproti zapojení s LDO stabilizátorem výhodněji o přibližně 10 Kč na jednu desku budiče.

4 OVĚŘENÍ FUNKCE ŘÍDICÍ A SILOVÉ ČÁSTI

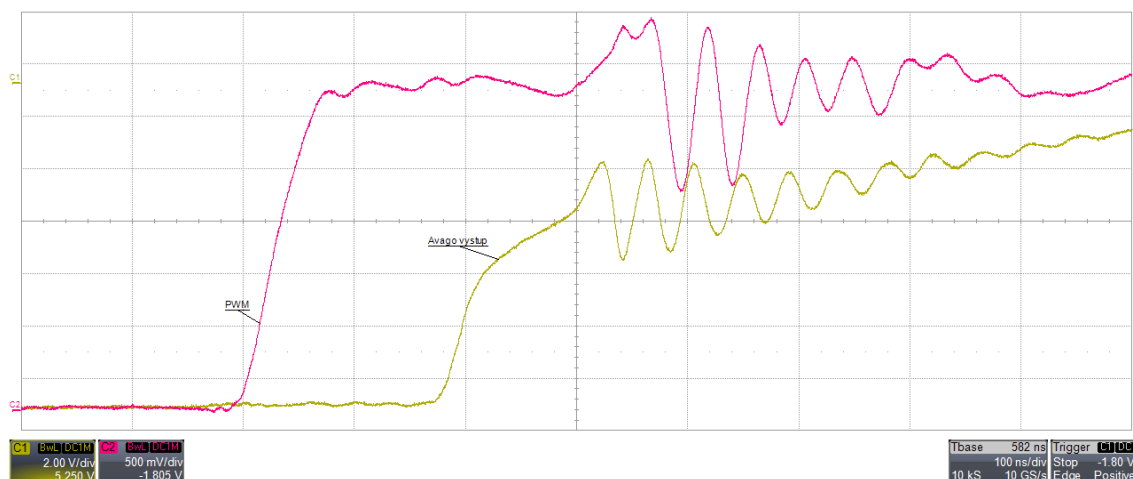
V rámci této práce proběhlo také ověření funkce řídicí a silové části. Úlohou každého měniče pro motor je na základě impulsů od řídicí části generovat výstupní napětí o takovém průběhu, aby bylo dosaženo požadovaných otáček, skluzu, momentu či jiných provozních parametrů motoru. Elementární úkolem tedy je aby se signály generované procesorem v nejkratším čase a s co možná nejmenším zkreslením objevily v dostatečné amplitudě na svorkách stroje. Prvním bodem ověřovaným v této kapitole bylo tedy měření dopravního zpoždění z výstupu PWM po větrové napětí na výstupu výkonové desky budiče.

Pokud od měniče požadujeme například regulaci na žádanou hodnotu momentu na hřídeli (například při úloze měření momentové charakteristiky asynchronního stroje) je nezbytným předpokladem udržování konstantního proudu kotvou stejnosměrného stroje. Pro regulaci proudu na konstantní hodnotu je posléze naprosto nezbytná zpětná vazba ve formě informace o aktuální hodnotě proudu. Tuto informaci dostává mikroprocesor z proudového čidla LEM umístěného na desce silových obvodů, dále putující přes invertující OZ na základní desce posléze na RC filtr na procesorové desce a do A/D převodníku samotného procesoru. Dalším bodem tedy bylo zmapování kvality této informace, která vchází do mikroprocesoru.

Posledním měřením realizovaným v rámci této kapitoly bylo ověření funkce brzděného tranzistoru na brzděné desce. O tomto prvku je zde v kapitole 2.6 uváděno, že jeho případné zatížení bude pouze krátkodobé, čímž se nepředpokládají problémy s odvedením jeho tepelných ztrát. Cílem toho testu tedy bylo dříve uvedené tvrzení ověřit.

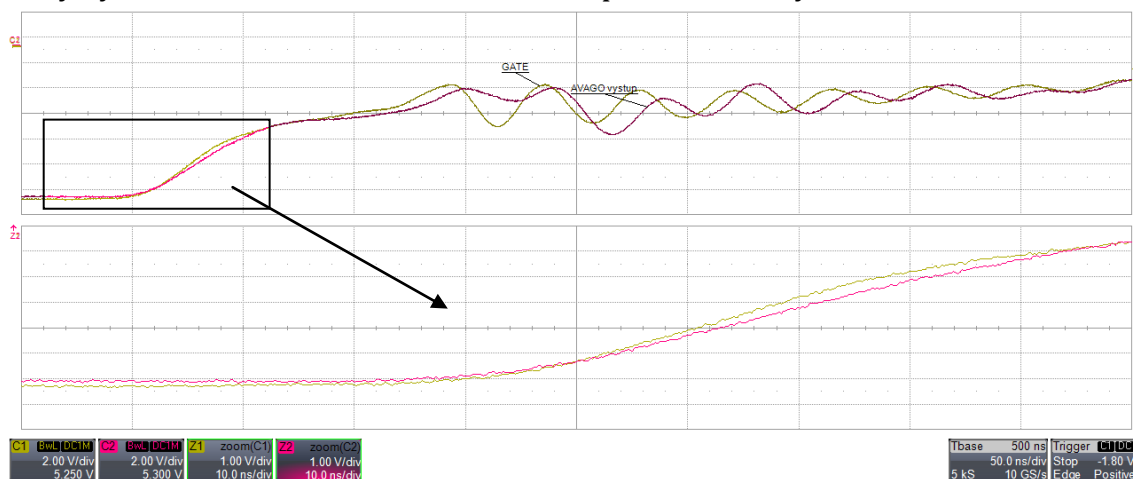
4.1 Měření zpoždění signálu z mikroprocesoru na svorky stroje

Prvním úsekem cesty signálu, na kterém bylo měřeno zpoždění bylo mezi body výstupu PWM a výstupu z obvodu budiče ACPL333J. Na tomto úseku signál prochází přes galvanické oddělení za pomoci optočlenu a dále je zesilován pro potřeby rychlého nabíjení kapacity hradla. Na obou zmíněných stupních dochází ke zpoždění. Výrobce udávané hodnoty zpoždění jsou dle [4] min. 100 ns typ. 180 ns max. 250 ns. Hodnoty jsou uvedené pro případ spínání hradla s kapacitou 10nF což přibližně koresponduje s kapacitou hradla použitého tranzistorového modulu, která činí 9,1nF [3]. Na obrázku 4.1 jsou zobrazeny naměřené průběhy. Naměřené zpoždění skutečně dosahuje přibližně udávaných 180 ns.



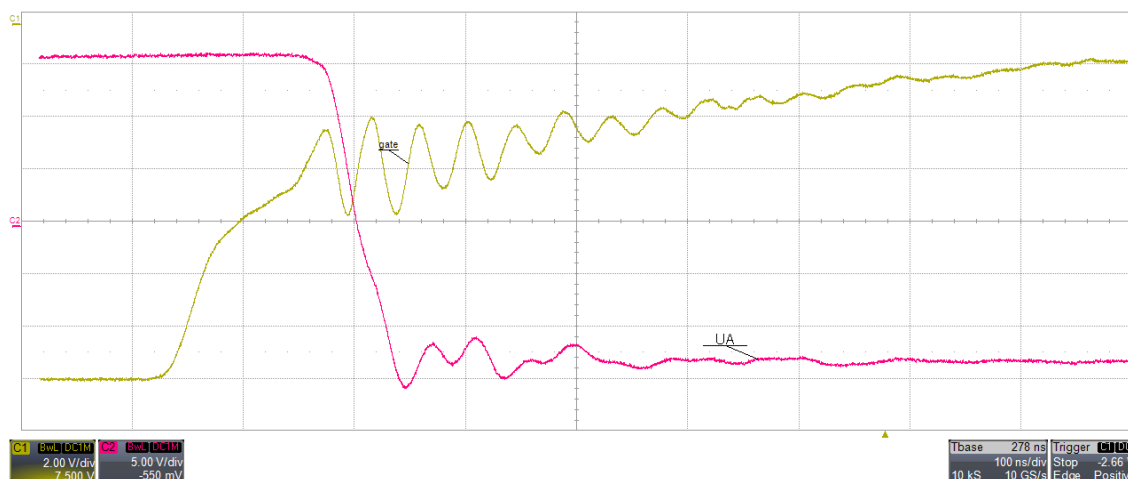
Obrázek 4.1 Naměřené zpoždění na obvodu budiče

Pouze z formálního hlediska bylo změřeno zpoždění z výstupu desky budiče na hradlo tranzistoru. Jelikož se jedná o galvanické spojení nemůžeme zde skutečně žádné zpoždění pozorovat. Dále zde nepozorujeme ani znatelný útlum signálu, který by svědčil o nevhodném dimenzování proudové cesty.



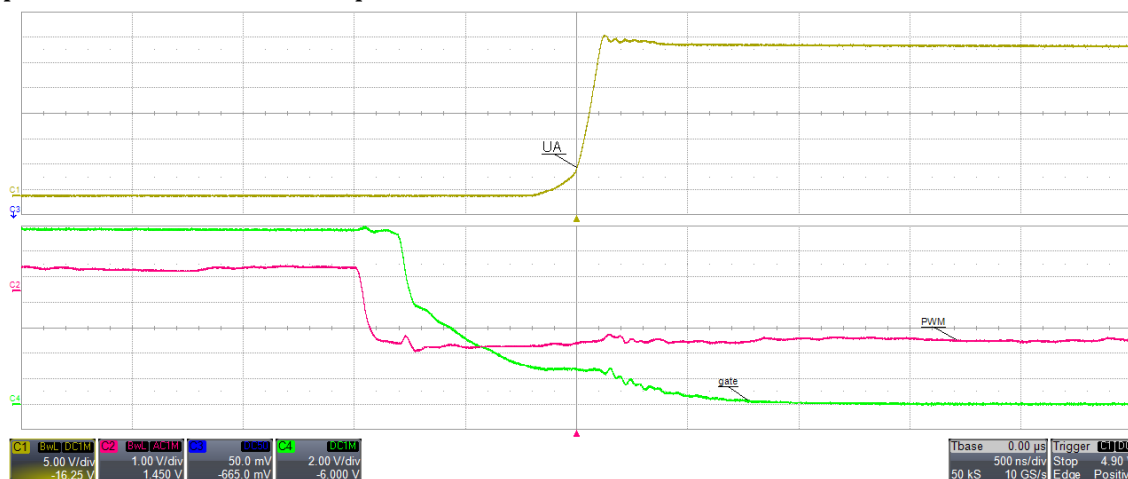
Obrázek 4.2 Proudová cesta Avago - gate bez útlumu, či zpoždění

Doba otevírání tranzistoru byla stanovována na výkonové desce pro stejnosměrný motor. Sledováno bylo napětí na hradle dolního tranzistoru ve větvi A, dále pak průběh větrového napětí větve A označeného jako U_A . Ideálním ukazatelem plného otevření tranzistoru by bylo měření času do ustálení kolektorového proudu. Toto měření však v tranzistorovém modulu není možné provést a proto za okamžik plného otevření tranzistoru uvažujeme okamžik úplného ustálení větrového napětí. Měření je zaznamenáno na obrázku 4.3 a ukazuje, že doba do úplného otevření tranzistoru je minimálně 400 ns.



Obrázek 4.3 Měření doby zapínacího děje tranzistoru

Při měření vypínacího děje byla však zaznamenána znatelně delší vypínací doba a to až 900 ns viz obrázek 4.4. Vypínací pochod je totiž značně prodlužován zanikáním kolektorového proudu. Na tomto průběhu můžeme také oproti záznamu zapínacího děje mnohem lépe pozorovat vliv Millerovy kapacity v oblasti prahového hradlového napětí.

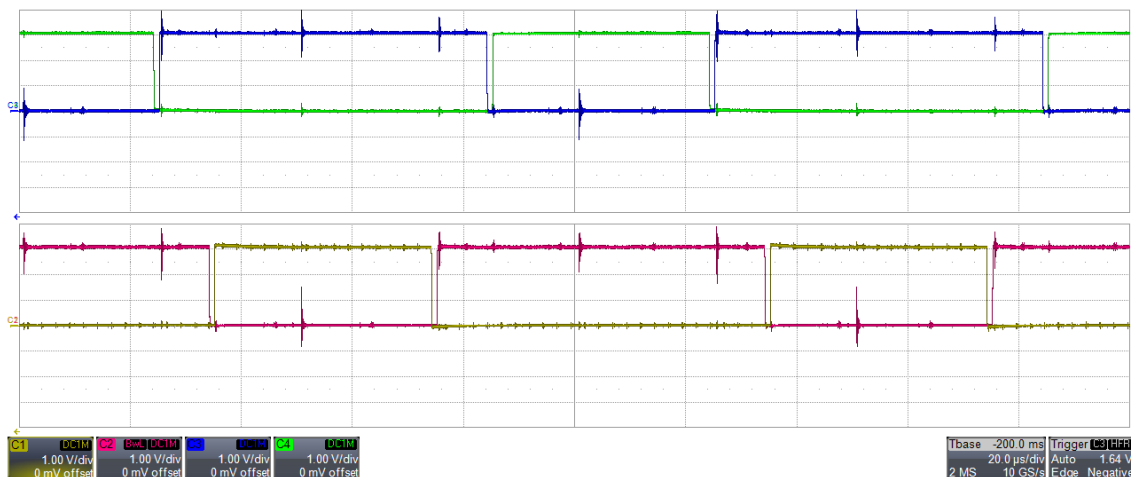


Obrázek 4.4 měření doby vypínacího děje

S nyní uvedenou dobou zapínacího a vypínacího děje přímo souvisí takzvaná ochranná doba neboli "dead time" kterou je nutné nastavit. Jedná se o délku povinné prodlevy mezi sepnutím dolního a horního tranzistoru v jedné větvi. Tato doba zabráňuje současnému sepnutí obou tranzistorů důsledkem kterého by došlo ke zkratu meziobvodu. Z kontrolních důvodů byla tedy nyní změřena doba dead time, která je momentálně softwarově nastavena - viz. obrázky 4.5 a 4.6. Měření ukazuje, že tato doba je nastavena na 1 μ s a na základě výše uvedených poznatků nutno říci, že tuto dobu za současného zapojení budičů nelze dále zkrátit. Uvedená doba je shodně nastavena pro větev A i větev B.



Obrázek 4.5 detail délky dead time ve větvi A



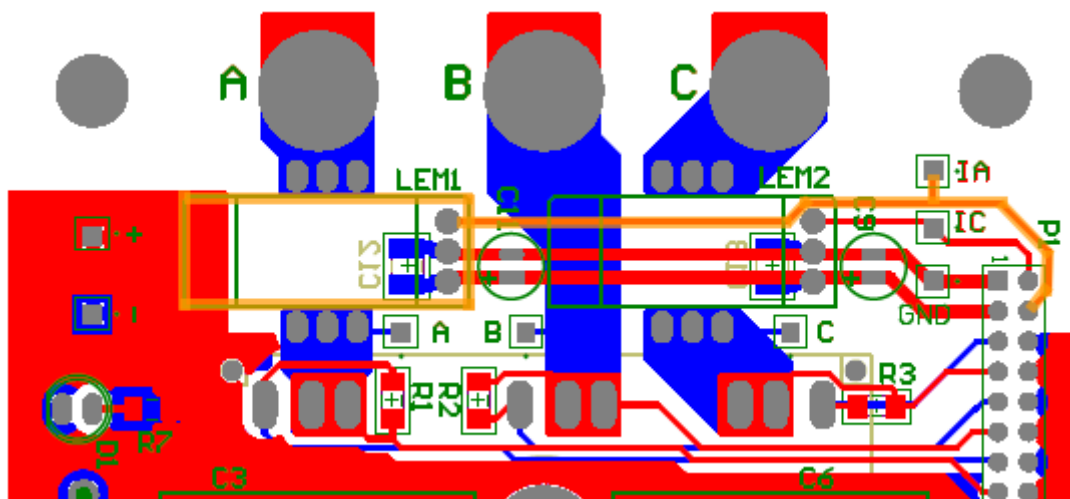
Obrázek 4.6 Komutace PWM signálů obou větví

4.2 Měření proudu motoru

Již bylo zmíněno, že nezbytnou informací pro každý měnič pro motor je informace o skutečném proudu kotvou, popřípadě fází. Žádný regulátor nemůže nastavit konstantní proud na základě silně zarušené zpětné vazby. Zvláště má-li stejnosměrný motor plnit funkci dynamometru, lze informaci o proudu resp. momentu považovat za naprosto stěžejní.

Na desce výkonových obvodů jejichž návrhem se roku 2012 zabýval ve své bakalářské práci [11] Ing. Picmaus je informace o proudu získávána za pomoci čidla LEM LTS-25NP. Jedná se o čidlo s Hallovou sondou mající napěťový výstup. Na desce výkonových obvodů jsou vyvedeny piny pro kontrolu výstupního signálu, bez demontáže desky není možné signál zkontrolovat na žádném místě blíže samotného čidla. Signál nesoucí informaci o proudu z větve A křížuje přímo ve

spodní vrstvě vedoucí silový spoj z větve B jehož proud není měřen. Dále je veden signál o proudu ve větvi A v bezprostřední blízkosti čidla snímajícího proud ve větvi C. Je tedy zřejmé, že ihned za výstupem z proudového čidla je signál zarušován hned dvěma zdroji. K ilustraci výše zmiňovaných tvrzení je uveden obrázek 4.7.

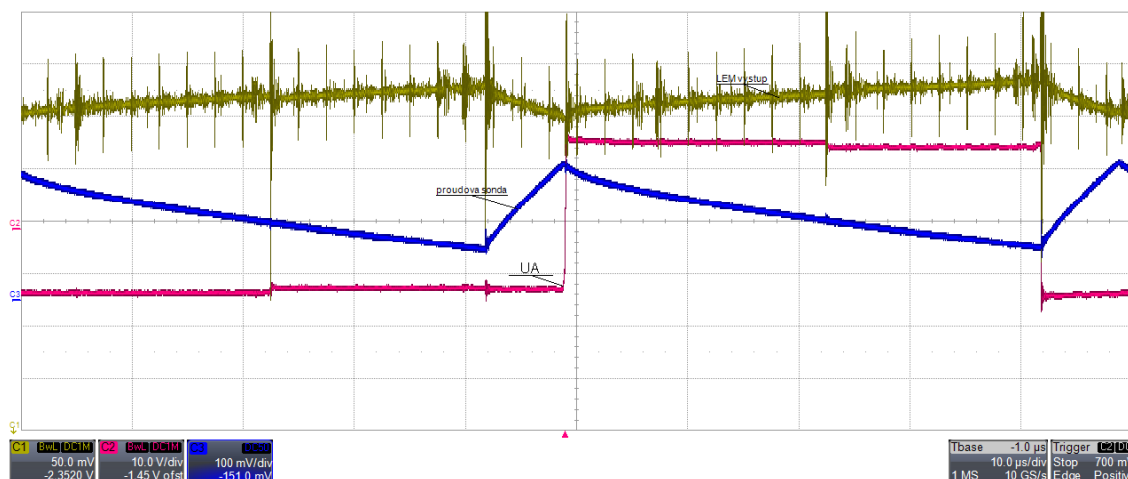


Obrázek 4.7 Detail návrhu desky výkonových obvodů - signál z čidla LEM

Návrh desky výstupního výkonového stupně je vždy obtížnou otázkou a řešení křížení silových a signálových spojů je jeden z předních důvodů proč tomu tak je. To že autor zohlednil přítomné rušení je zřejmé z implementace kondenzátorů C11 a C9, které dodatečně stabilizují napájecí napětí čidel a jsou umístěné principiálně co nejblíže spotřebiči. Cenný výstupní signál však podobným jednoduchým způsobem ošetřit nelze a ve výsledku zde není ošetřen vůbec.

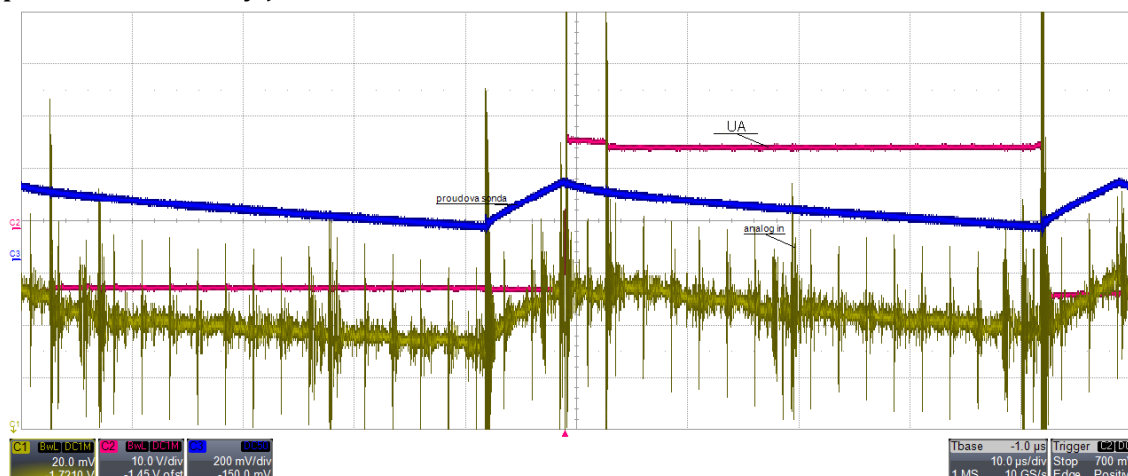
S ohledem na zmiňované užití stejnosměrného motoru ve funkci dynamometru a tedy i hodnotu informace o proudu by zde snad stálo za zvážení osadit namísto čidla LEM1 čidlo LEM2 jehož výstup nekřížuje již žádnou silovou cestu. K řízení stejnosměrného motoru by pak logicky muselo být použito větví B a C, což by vedlo i k nutnosti osazení patřičných desek budičů, propojených přes základní desku k těmto tranzistorům.

Průběh naměřeného signálu na kontrolním pinu I_A viz. obrázek 4.7, v porovnání s naměřeným proudem pomocí proudové sondy je na obrázku 4.8. Na průbězích můžeme vidět významné zarušení v okamžicích spínání sousedních tranzistorů. Pozorovat můžeme ale také další rušení o nižší amplitudě, které může být vysíláno například i sousední deskou výkonových obvodů obsluhující asynchronní motor.



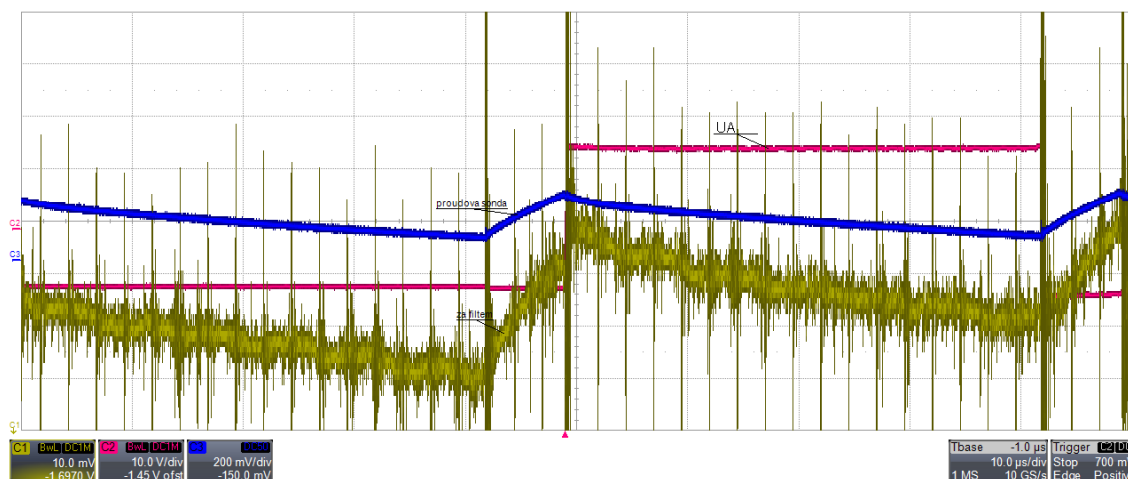
Obrázek 4.8 výstup čidla LEM a proud měřený proudovou sondou

Signál z proudového čidla putuje dále na operační zesilovač OPA2340UA, kde je signál invertován a jeho amplituda snížena na rozsah A/D převodníku procesoru 0 - 3.3V. Dále vede pod deskami budičů, které jsou nepochybně zdroji dalšího rušení a nakonec okolo DC/DC měniče Meanwell. Podoba signálu, který dorazí na vstup procesorové desky je na obrázku 4.9.



Obrázek 4.9 Signál z čidla LEM na vstupu procesorové desky

Pro částečné vyfiltrování vstupních signálů A/D převodníku je na procesorové desce osazen RC filtr 1. řádu. Průběh signálu vstupující do procesoru za tímto filtrem je na obrázku 4.10. Zdá se, že parametry tohoto filtru nejsou pro tento typ signálu navrženy příliš vhodně. Výsledná lomová frekvence filtru je patrně volena velmi vysoko s ohledem na kmitočty, na kterých se vyskytuje rušení. Částečný přínos tohoto filtru však lze pozorovat.

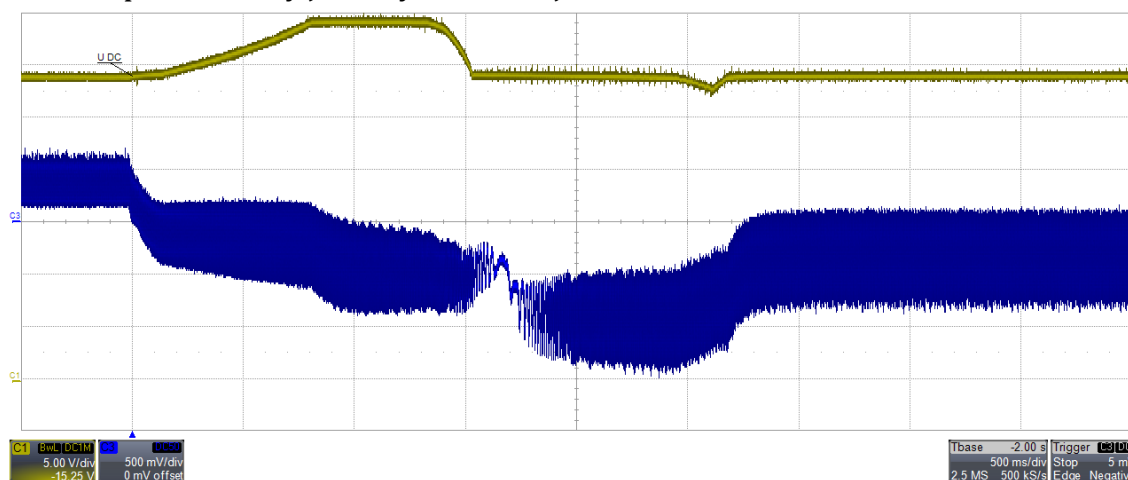


Obrázek 4.10 Signál z čidla LEM po filtraci na procesorové desce

4.3 Ověření funkce brzděné desky při reverzaci DC stroje

Jak již bylo avizováno, bylo provedeno měření průběhu napětí v meziobvodu standu při velmi příznivém stavu konkrétně reverzaci ze střídy 1 v kladném směru otáčení do střídy 0,6 v záporném směru. Změna střídy proběhla po softwarově předdefinované rampě. Naměřené průběhy jsou na obrázku 4.11, modře je průběh proudu zaznamenaný proudovou sondou, žlutě napětí v meziobvodu.

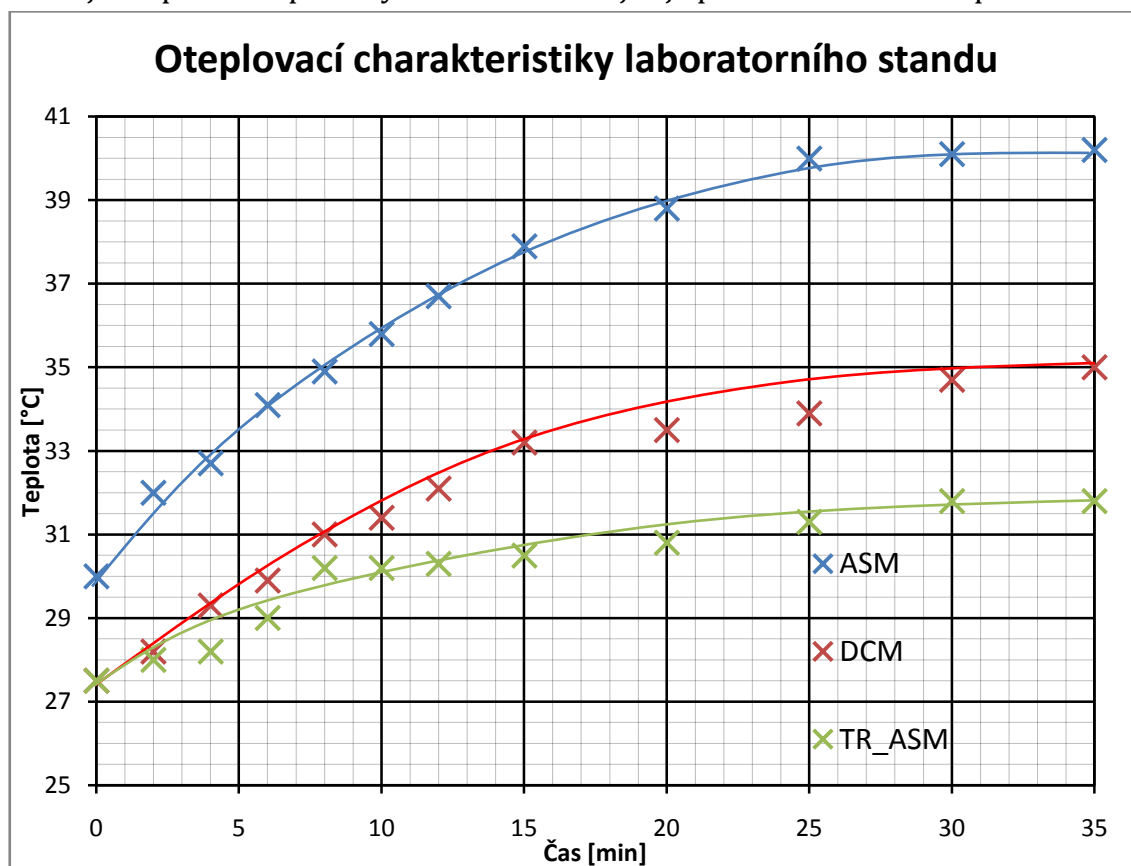
Po požadavku na reverzaci můžeme sledovat postupný nárůst napětí v meziobvodu, končící v necelých 35 V, kdy zasáhne brzděná deska. Doba otevření brzděného tranzistoru není delší než 700 ms, což potvrzuje dříve uváděná tvrzení. Ještě před dosažením nulových otáček je již napětí v meziobvodu zpět na hodnotě dodávané ze zdroje, následný drobný pokles napětí je zde pozorovatelný jelikož byl použit zdroj schopný dodat maximální proud 4 A což v závěru akcelerace na žádané opačné otáčky již nebylo dostačující.



Obrázek 4.11 Ověření funkce brzděné desky

5 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA SYSTÉMU, OVĚŘENÍ FUNKCE CHLAZENÍ

Jelikož jedním z hlavních cílů této práce je fyzická realizace dalších pracovišť, je nezbytné před samotnou realizací znovu ověřit, zdali dříve navrhované chlazení systému skutečně dostačuje svými parametry. Z hlediska chlazení výkonových stupňů standu je hlavním chladičem samotná konstrukce pracoviště. V práci Ing. Picmause [11] byl již dříve proveden výpočet ztrát obou výkonových stupňů s výsledky 11 W na výkonovém stupni asynchronního motoru a 24 W na straně stejnosměrného motoru. Na odvedení těchto ztrát se bude podílet celé lože desek plošných spojů laboratorního standu jehož dispozice budou podrobněji uvedeny v kapitole 6 (výkresová dokumentace v přílohách práce). Předběžným předpokladem však je, že z hlediska odvodu tepelných ztrát bude v celém systému limitujícím prvkem spíše asynchronní motor jež je použit v uzavřeném provedení.



Obrázek 5.1 Naměřené průběhy oteplení při zatěžovací zkoušce - teplota okolí 27°C

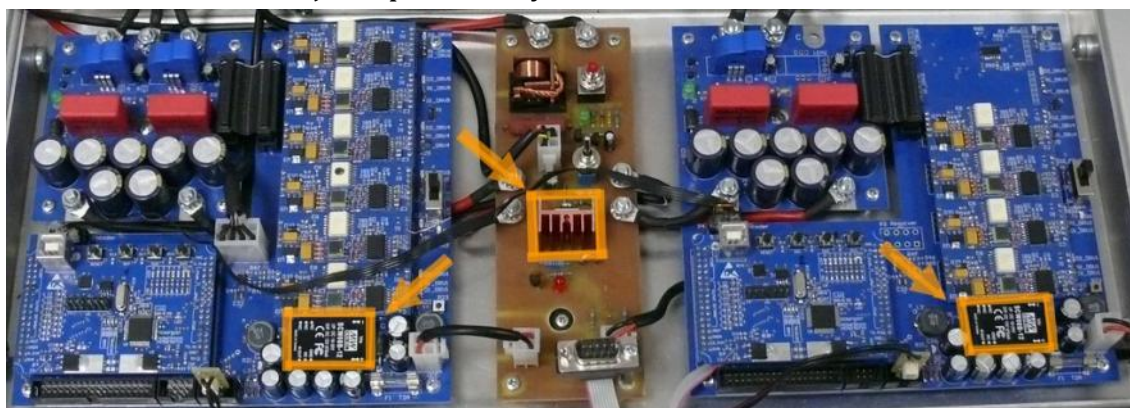
V době provádění zatěžovací zkoušky nebyl dostupný dostatečně stabilní software pro laboratorní stand, který by umožnil dlouhodobou zatěžovací zkoušku v řádu desítek minut, z tohoto důvodu byl při testu roztáčen měničem asynchronní motor, stejnosměrný motor byl však brzděn do odporu.

Asynchronní motor byl již v počátku měření oteplen o přibližně 3°C nad teplotu okolí z předchozího testování, závěrem oteplovací zkoušky byl však ve všech měřených bodech zaznamenán jednoznačně se ustalující trend. Při ustáleném oteplení můžeme zjednodušeně tvrdit, že všechno generované teplo je v takovém okamžiku odváděno do okolí.

Brzdný proud stejnosměrného motoru byl udržován na hodnotě 15,6 A, ze jmenovitých parametrů stroje [1] můžeme dopočít, že zatěžovací moment v průběhu zkoušky dosahoval tedy přibližně 0,9 Nm.

V důsledku brzdění stejnosměrného motoru do odporu nebyla logicky zaznamenávána teplota tranzistorového modulu stejnosměrného motoru. Celkového ustáleného oteplení dle grafu na obrázku 5.1 dosáhlo 5°C na tranzistorovém modulu asynchronního motoru, přes 13°C na povrchu asynchronního stroje a 9°C na povrchu stejnosměrného stroje. Navzdory 2,2 násobně větším výpočtovým ztrátám na výkonových obvodech stejnosměrného motoru oproti sousednímu modulu motoru asynchronního, lze předpokládat že ustálené oteplení modulu stejnosměrného motoru by nepřesáhlo oteplení asynchronního stroje. Toto tvrzení lze podkládat znalostmi zákonů o šíření tepla.

Poznatek o nejvyšším oteplování asynchronního motoru v rámci všech výkonových prvků lze potvrdit i na základě zkušeností z ostatních zkoušek, při nichž teplota výše měřených prvků nebyla zaznamenávána, nýbrž pouze kontrolována. Obecně lze tedy konstatovat, že pokud bude kontrolována v rámci nadcházejících laboratorních měření teplota asynchronního stroje, není zapotřebí sledovat žádné další teploty jelikož z hlediska přetížitelnosti celého pracoviště je v tomto okamžiku limitujícím prvkem asynchronní motor.



Obrázek 5.2 Další prvky standu s významnými tepelnými ztrátami

Z hlediska tepelných ztrát je vhodné v rámci pracoviště zmínit také DC/DC měniče značky Meanwell jež jsou v současnosti osazené na prototypním pracovišti. Tyto měniče jsou provozovány na horním limitu vstupního napětí a často se přehřejí. Důsledkem přehřátí těchto měničů je posléze mimo provoz celé pracoviště jelikož napájejí většinu elektroniky na základních deskách. Dalším

značně zahřívajícím se prvkem nastavitelný lineární stabilizátor osazený pro možnost dvojstupňové regulace otáček ventilátoru asynchronního motoru. Teplota těchto zmíněných prvků přesáhla při náhodných měřeních 45°C.

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ MECHANICKÝCH ČÁSTÍ

Po kontrole dimenzování chladicí plochy desek výkonových obvodů provedením oteplovací zkoušky v rámci předchozí části práce mohlo být přistoupeno k realizaci zbylých pracovišť.

6.1 Výroba plechů pod motory a lože elektroniky standu

V okamžiku zadání této bakalářské práce již byly kompletní rámy pro všechna pracoviště. Jedná se o rámy z duralových profilů o vnějším rozměru 570 x 435 mm. Vnitřní prostor rámu je v horní části rozdělen přepážkou, která slouží jako opora pro montáž soustrojí motorů. Zbývající vnitřní rozměr rámu 480 x 240 mm je určen pro osazení veškeré elektroniky. Stavba jediného stávajícího pracoviště byla provedena formou kusové ruční výroby. Ve snaze převážně eliminovat možné nepřesnosti a dále zrychlit výrobu bylo přistoupeno při realizaci ostatních pracovišť k vyhotovení výkresu rozvinutého tvaru, který již obsahoval veškeré konstrukční otvory. Na základě nové dokumentace byla posléze zadána výroba metodou řezu vodním paprskem.

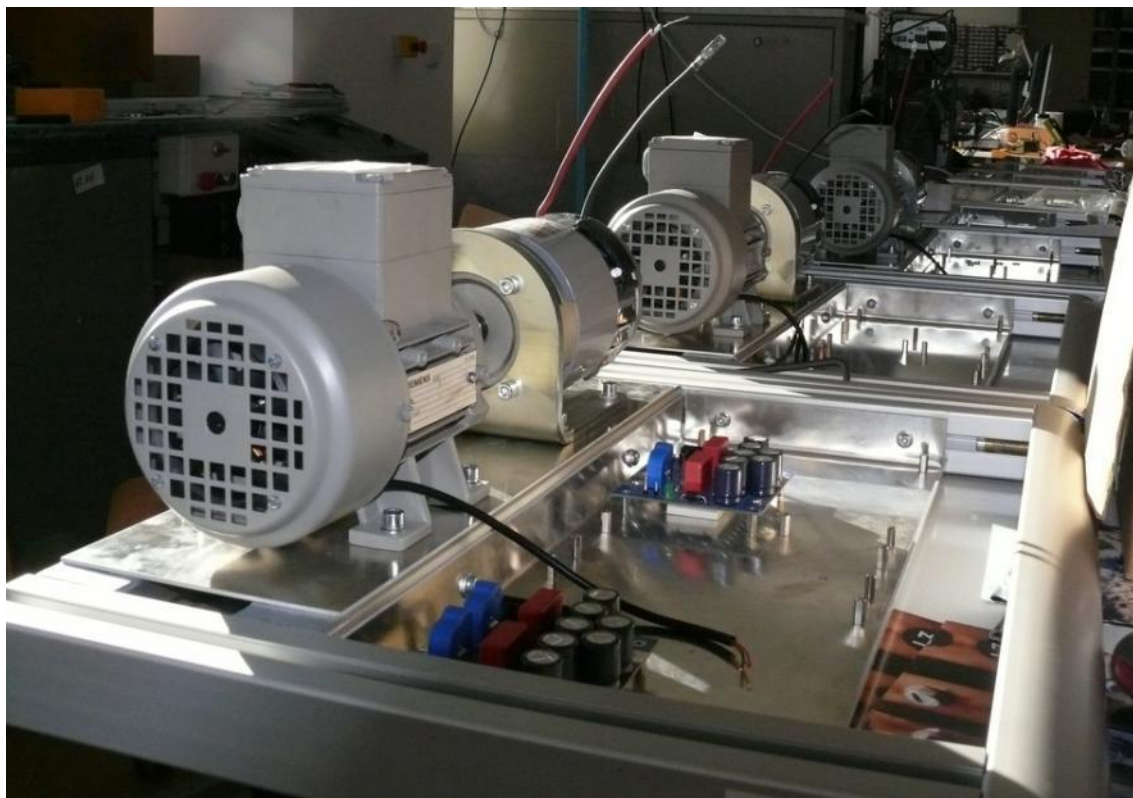
Při vytváření nové výkresové dokumentace bylo nejprve čerpáno z dřívějších diplomových prací [1][2]. Posléze byly však všechny rozměry zkontrolovány na základě aktuální dokumentace ke všem osazovaným DPS, jejichž dokumentace byla mimo jiné pro tyto účely autorovi této práce poskytnuta. Rozměry základní plochy a poloha děr pro montáž jednotlivých DPS byla upraveny dle požadavků vedoucího práce s ohledem na následné vsazení vzniklého lože do rámu a požadovanou polohu DPS.

Plech pod motory zůstaly nezměněny oproti řešení použitým na prvním vyhotovení pracoviště. Jejich výroba navzdory nižší konstrukční náročnosti byla shodně provedena metodou řezu vodním paprskem.

Na základě příznivých referencí a nabídnuté ceny byla výroba zadána ve společnosti Awac s. r. o sídlící v Brně - Řečkovících. Nová výkresová dokumentace, která byla předmětem zmíněné zakázky je součástí příloh této práce. Po vyhotovení zde byly hotové výřezky vyzvednuty a provedeno ohýbání rozvinu plechu do podoby vsazovaného lože. V laboratoři SA3.08 proběhla kompletace původních rámu s plechy a následně osazení rámu motory.

6.2 Kompletace pracovišť

V rámci realizace konstrukčních částí bylo osazeno všech 8 dostupných rámců novými loži pro DPS. Všechny přírubové stejnosměrné motory byly namontovány na L profily umožňující patkovou montáž. Na hřídele stejnosměrných motorů byly dále nalisovány části spojky ROTEX®. Asynchronní motory bylo nutné osadit aktivními ventilátory jež nahrazují původní ventilátory na hřídeli, které musely být demontovány pro možnost osazení resolveru. Hřídel asynchronního motoru byla taktéž opatřena protikusem spojky ROTEX®. Závěrem byla provedena montáž celého soustrojí na rám standu, kompletace spojení soustrojí byla dokončena vložním pružného členu.



Obrázek 6.1 Průběh realizace zbylých pracovišť

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce pojednávala o laboratorním výukovém standu se soustrojím asynchronního a stejnosměrného motoru. Po seznámení se s topologií pracoviště a širšími souvislostmi z hlediska funkce a vzájemné spolupráce jednotlivých desek pracoviště bylo přistoupeno k revizi desky budiče.

Práce na desce budiče započala uvedením do problematiky saturační ochrany, následovalo podrobné studium konkrétního zapojení a vlastností použitého obvodu Avago ACPL333J. V okamžiku zadání této bakalářské práce vybavovala saturační ochrana budiče za mnohem nižších proudů, než bylo žádoucí. Po testování mnoha prototypních obvodů byla stanovena 2 zapojení, která spolehlivě řeší předchozí problém. Po konzultaci s vedoucím práce bylo zvoleno jednodušší a robustnější řešení za použití Zenerovy diody. Pro zvolené řešení byl v prostředí Altium Designer vypracován nový návrh desky plošných spojů, který je již zadán do výroby.

Mimo rozbor a revizi funkce saturační ochrany desky budiče bylo uvedeno i hlubší pojednání o napájecí části jež v minulosti prošla mnoha revizemi. Jelikož se nyní osazený obvod UC3825 stále zahřívá na teploty okolo 45°C na povrchu, byla osazena pokusná deska budiče s využitím zaměnitelného obvodu MC33025 od jiného výrobce. Zmíněná záměna nepřinesla výrazné zlepšení a proto byla testovaná také možnost snížení spínací frekvence a střídý impulzního transformátoru. Touto cestou již bylo dosaženo pozitivních výsledků, dosažené zlepšení však přesto nenaplnilo očekávání. Od změny obvodového zapojení napájecí části bylo tedy upuštěno. Jelikož je však deska budiče univerzální mohou být zde prezentované výsledky v budoucnu využity v případných dalších aplikacích, kde bude nezbytné dosáhnout odlišných parametrů.

Pro potřeby budoucího vývoje software pro laboratorní pracoviště a k ověření funkce současného zapojení jakožto celku bylo provedeno mapování důležitých řídicích signálů. Stanoveno bylo dopravní zpoždění budiče, dále spínací a vypínací časy výkonových tranzistorů. Naměřené hodnoty odpovídají udávaným parametrům výrobců konkrétních komponent a lze je považovat za uspokojivé. Sledována byla také podoba informace o proudu z proudového čidla LEM po vstup do A/D převodníku mikroprocesoru. Zaznamenané průběhy vykazují značné zarušení, přínos implementovaného filtru na procesorové desce není příliš významný. V práci byly diskutovány pravděpodobné zdroje tohoto zarušení a byly navrženy drobné změny, které by tento stav mohly zlepšit.

K ověření funkce chlazení celého systému byla provedena oteplovací zkouška, při které byl asynchronní stroj nyní plnící funkci motoru zatěžován

momentem 0,9 Nm po dobu 35 minut. Jako hlavní výsledek zkoušky lze uvést, že právě asynchronní motor je z hlediska zatížitelnosti celého systému limitujícím prvkem. Chlazení tranzistorových modulu se ukázalo jako zcela dostačující.

Významnou částí této bakalářské práce byla konstrukční realizace dalších 8mi pracovišť tohoto druhu. Zhotovena byla nezbytná výkresová dokumentace plechových dílců, na základě které byla zadána výroba externí firmě. Pořízen byl veškerý nezbytný spojovací materiál proběhla finální kompletace pracovišť z mechanického hlediska.

Literatura

- [1] Hudák, O. Laboratorního soustrojí s asynchronním a stejnosměrným motorem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 59s. Vedoucí diplomové práce Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.
- [2] ONDREJČEK, V. *Řídicí systém laboratorního standu pro výukové účely*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.
- [3] Alldatasheet [online]. 2006 [cit. 2016-12-10]. SK115MD10 datasheet. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/206508/SEMIKRON/SK115MD10.html>
- [4] *Datasheet ACPL-333J-000E* [online]. In: . Avago Technologies, 2015 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <https://docs.broadcom.com/docs/AV02-1087EN>
- [5] *Application Note 5315: "Soft" Turn-off Feature* [online]. In: . Avago Technologies, 2010 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <https://docs.broadcom.com/docs/AV02-0073EN>
- [6] *Datasheet MC33025* [online]. In: . ON SEMICONDUCTOR, 2012 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC34025-D.PDF
- [7] *Datasheet WE-GDT-760301106* [online]. In: . WÜRTH ELEKTRONIK, 2014 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://katalog.we-online.com/pbs/datasheet/760301106.pdf>
- [8] *Datasheet TLV431AQFTA* [online]. In: . Diodes Incorporated, 2014 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: http://www.diodes.com/_files/datasheets/TLV431Q.pdf
- [9] *Datasheet BAT42* [online]. In: . Vishay Intertechnology, 2016 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/85660/bat42.pdf>
- [10] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUT IUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.

[11] PICMAUS, M. Realizace malého střídavého měniče řízeného mikropočítačem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Knobloch.

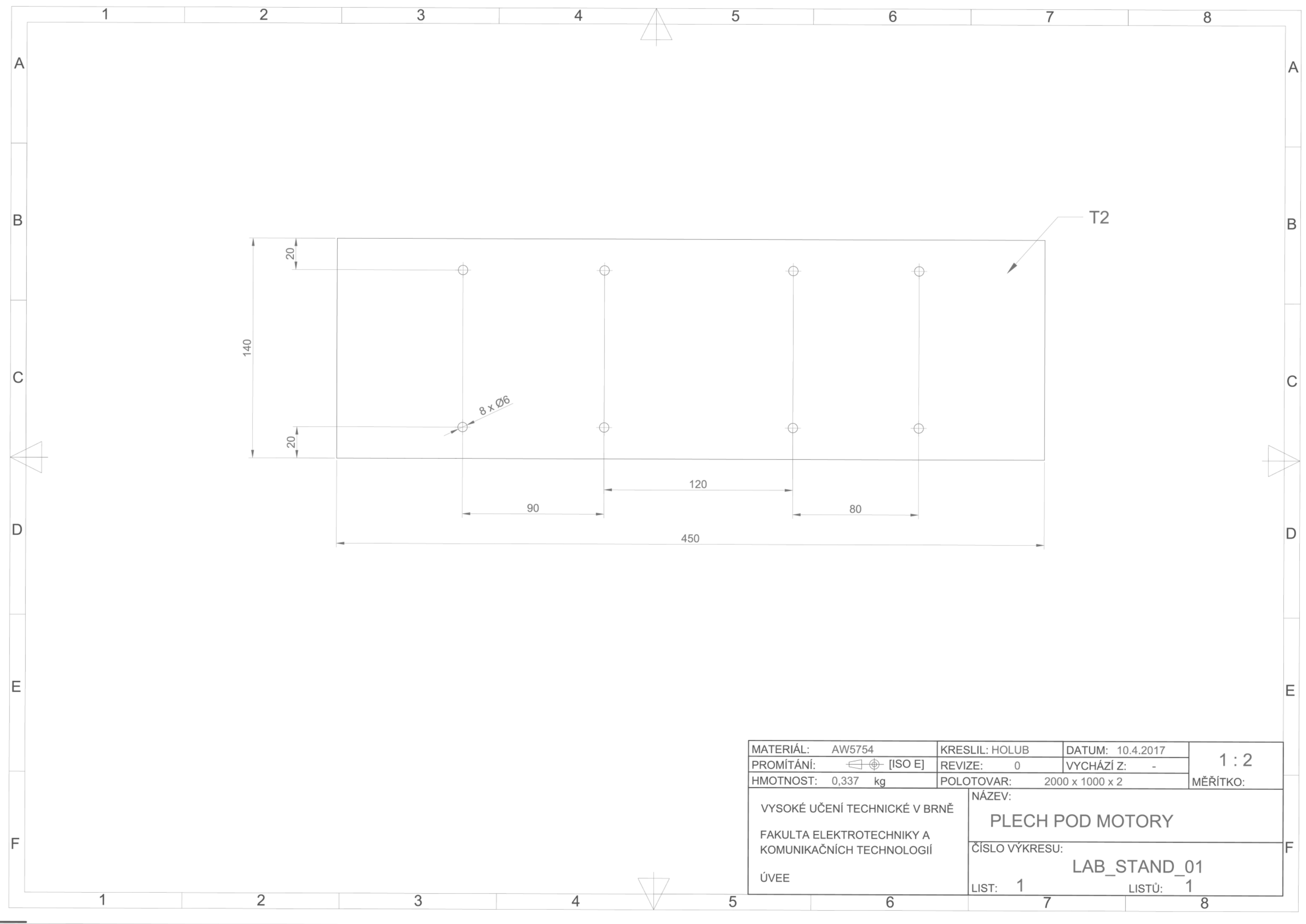
Seznam symbolů, veličin a zkratek

$R_{DS(ON)}$ [Ω]	Odpor kanálu tranzistoru MOSFET v sepnutém stavu
$t_{DESAT(10\%)}$ [s]	Čas vybavení saturační ochrany od detekce po omezení proudu na 10%
$U_{TRthDes}$ [V]	Napětí na tranzistoru, při kterém dojde k vybavení saturační ochrany
U_{thDes} [V]	Napětí na pinu saturační ochrany, při kterém dojde k jejímu vybavení
U_{DS} [V]	Napětí mezi drainem a sourcem na tranzistoru MOSFET
I_{Des} [A]	Proud pinu saturační ochrany
U_{Des} [V]	Napětí na pinu saturační ochrany
U_{D10} [V]	Úbytek napětí na diodě D10 v obvodu saturační ochrany
C_t [F]	Kapacita časovacího kondenzátoru obvodu MC33025
R_t [Ω]	Odpor časovacího rezistoru obvodu MC33025
ET [Ω]	Konstanta udávající maximální sycení impulzního transformátoru
U_p [V]	Primární napětí impulzního transformátoru
f_{min} [Hz]	Minimální frekvence pro zamezení přesycování transformátoru
s [-]	Střída
R_{DT} [Ω]	Odpor přídavného rezistoru pro spínací snížení střídny obvodu MC33025
u_{CT} [V]	Napětí na časovacím kondenzátoru obvodu MC33025
u_{OUTA} [V]	Napětí na výstupu A obvodu MC33025
u_{OUT} [V]	Výstupní napětí budiče ACPL333J
u_{TLV} [V]	Napětí na napěťové referenci TLV431
R_{gd} [Ω]	Odpor rezistoru zvyšujícího proud v obvodu saturační ochrany
V_{cc} [V]	Napájecí napětí obvodu ACPL333J
R_{z1} [Ω]	Odpor rezistoru 1 nastavující napětí na TLV431
R_{z2} [Ω]	Odpor rezistoru 2 nastavující napětí na TLV431
I_{ref} [A]	Proud vtékající do pinu reference u TLV431
C_{z1} [F]	Kapacita kondenzátoru omezujícího překmit napětí na TLV431
OZ	Operační zesilovač
DPS	Deska plošných spojů

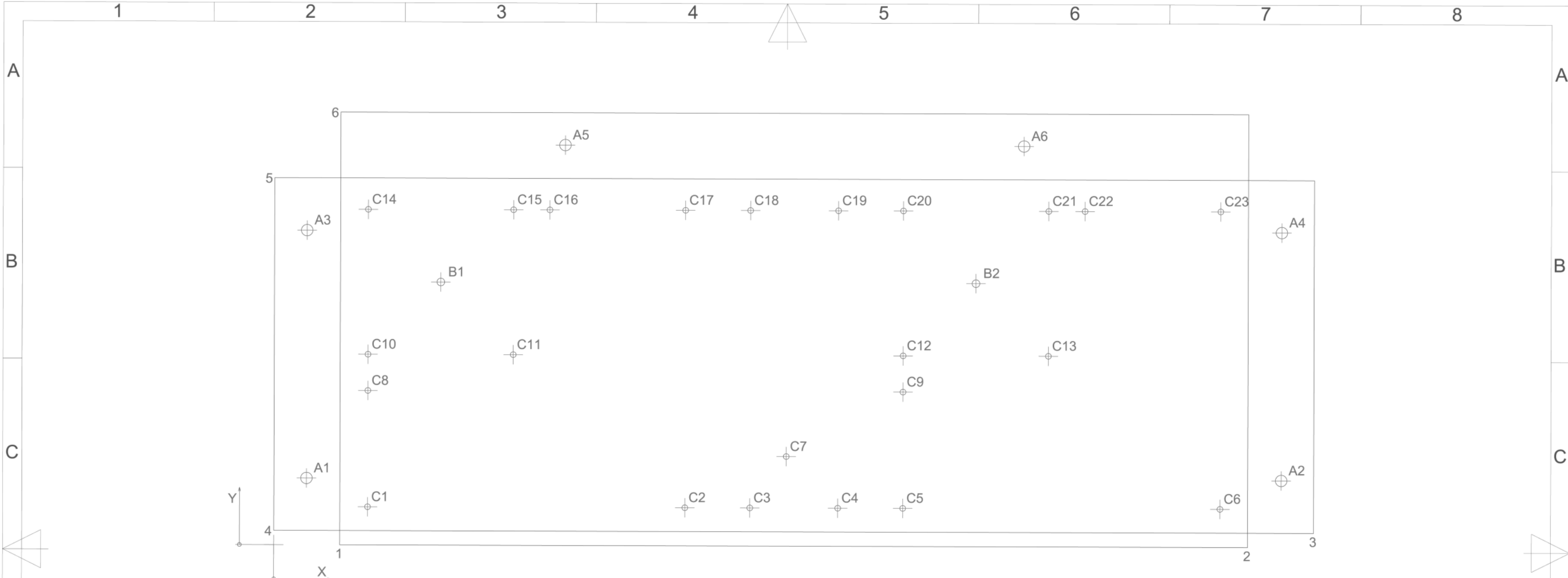
Seznam příloh

Příloha 1) Výkresová dokumentace k plechu pod soustrojí standu

Příloha 2) Výkresová dokumentace k rozvinu plechu pro lože elektroniky standu



MATERIÁL: AW5754	KRESLIL: HOLUB	DATUM: 10.4.2017	1 : 2
PROMÍTÁNÍ:  [ISO E]	REVIZE: 0	VYCHÁZÍ Z: -	
HMOTNOST: 0,337 kg	POLOTOVAR: 2000 x 1000 x 2	MĚŘÍTKO:	
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚVEE		NÁZEV: PLECH POD MOTORY	
		ČÍSLO VÝKRESU: LAB_STAND_01	
		LIST: 1	LISTŮ: 1



Pozice	X	Y	Ø	Pozice	X	Y	Ø	Pozice	X	Y	Ø
1	34,5	0,0	---	B2	367,0	138,0	4.0	C13	405,0	100,0	3.0
2	509,5	0,0	---	C1	49,0	20,0	3.0	C14	49,0	176,0	3.0
3	544,0	7,5	---	C2	215,0	20,0	3.0	C15	125,0	176,0	3.0
4	0,0	7,5	---	C3	249,0	20,0	3.0	C16	144,0	176,0	3.0
5	0,0	192,5	---	C4	295,0	20,0	3.0	C17	215,0	176,0	3.0
6	34,5	227,0	---	C5	329,0	20,0	3.0	C18	249,0	176,0	3.0
A1	17,0	35,0	6.0	C6	495,0	20,0	3.0	C19	295,0	176,0	3.0
A2	527,0	35,0	6.0	C7	268,0	47,0	3.0	C20	329,0	176,0	3.0
A3	17,0	165,0	6.0	C8	49,0	81,0	3.0	C21	405,0	176,0	3.0
A4	527,0	165,0	6.0	C9	329,0	81,0	3.0	C22	424,0	176,0	3.0
A5	152,0	210,0	6.0	C10	49,0	100,0	3.0	C23	495,0	176,0	3.0
A6	392,0	210,0	6.0	C11	125,0	100,0	3.0				
B1	87,0	138,0	4.0	C12	329,0	100,0	3.0				

MATERIÁL: AW5754	KRESLIL: HOLUB	DATUM: 10.4.2017	1 : 2
PROMÍTÁNÍ:  [ISO E]	REVIZE: 0	VYCHÁZÍ Z: -	
HMOTNOST: 0,645 kg	POLOTOVAR: 2000 x 1000 x 2	MĚŘÍTKO:	
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ			NÁZEV: LOŽE ELEKTRONIKY STANDU
ÚVEE			ČÍSLO VÝKRESU: LAB_STAND_02
			LIST: 1 LISTŮ: 1